

**Editor
Muhammad Nur Findra
Waode Munaeni**



DAYA DUKUNG LINGKUNGAN RUANG LAUT



**Dwi Rosalina, Theresia, Syamsidar Gaffar,
Ramad Arya Fitra, Fitra Wira Hadinata,
Mohammad Faizal Ulkhaq
Novi Luthfiyana, Hawati, Hardiyanti YM
La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa
Daniel Heintje Ndahawali, Syahnul Sardi Titaheluw
Pratiwi Subianto, Ranno Marlany Rachman**

DAYA DUKUNG LINGKUNGAN RUANG LAUT

Penulis

Dwi Rosalina

Theresia

Syamsidar Gaffar

Ramad Arya Fitra

Fitra Wira Hadinata

Mohammad Faizal Ulkhaq

Novi Luthfiyana

Hawati

Hardiyanti YM

La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa

Daniel Heintje Ndahawali

Syahnul Sardi Titaheluw

Pratiwi Subianto

Ranno Marlany Rachman

Editor

Muhammad Nur Findra

Waode Munaeni



PENERBIT

PT. KAMIYA JAYA AQUATIC

DAYA DUKUNG LINGKUNGAN RUANG LAUT

Penulis : Dwi Rosalina, Theresia, Syamsidar Gaffar, Ramad Arya Fitra,
Fitra Wira Hadinata, Mohammad Faizal Ulkhaq, Novi
Luthfiyana, Hawati, Hardiyanti YM, La Ode Muhammad
Rauda Agus Udaya Manarfa, Daniel Heintje Ndahawali,
Syahnul Sardi Titaheluw, Pratiwi Subianto,
Ranno Marlany Rachman

Editor : Muhammad Nur Findra, Waode Munaeni

ISBN : 978-623-10-0929-6 (PDF)

Desain Sampul dan Tata Letak : Ahmad Fadli

Penerbit :

PT. Kamiya Jaya Aquatic

Anggota IKAPI No. 001/MALUKUUTARA/2024

Redaksi :

RT 008 RW 003 Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan,
Kota Ternate, Maluku Utara

Telp. : 0812-2279-3284

Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com

Website : <https://kjaquatic.com/>

Distributor :

PT. Kamiya Jaya Aquatic

Cetakan Pertama : Juni 2024

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Selamat datang dalam perjalanan ilmiah yang mendalam ke dalam dunia yang penuh misteri dan keajaiban: lingkungan ruang laut. Buku ini, "Daya Dukung Lingkungan Ruang Laut", merupakan sebuah pengantar komprehensif yang mengajak pembaca untuk menjelajahi kekayaan yang tersembunyi di dalam samudra yang luas. Laut bukan hanya sekedar lahan air yang mengelilingi benua, namun juga sebuah ekosistem yang kompleks dan dinamis. Dari dinamika oseanografi hingga keanekaragaman biologi laut, setiap hal yang ada di dalamnya memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekologis planet kita.

Buku ini tidak hanya mengungkap keindahan ekosistem laut, namun juga menghadirkan pemahaman mendalam tentang pemanfaatan sumber daya hayati laut dan tantangan pengelolaannya. Selain itu, isu-isu global seperti perubahan iklim dan pencemaran laut juga menjadi fokus utama, karena dampaknya yang merambah ke seluruh penjuru dunia. Namun, dalam setiap tantangan juga terkandung peluang. Buku ini juga membahas upaya konservasi dan pelestarian lingkungan ruang laut, serta pentingnya peran aktif dari komunitas lokal dalam menjaga kelestarian laut yang menjadi warisan bersama kita semua. Terakhir, buku ini menyoroti peran teknologi dan inovasi dalam menjawab panggilan untuk melindungi lingkungan ruang laut. Dengan pemanfaatan teknologi yang cerdas, kita dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya pelestarian yang lebih efektif.

Dengan demikian, mari bersama-sama menjelajahi dan merawat keindahan serta keberagaman lingkungan ruang laut untuk masa depan yang lebih baik bagi generasi mendatang. Selamat membaca!

Salam,

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii

Bab 1 PENGENALAN LINGKUNGAN RUANG LAUT1

1.1 Ekosistem Laut.....	2
1.2 Ekosistem Mangrove.....	3
1.3 Ekosistem Lamun	5
1.4 Ekosistem Terumbu Karang.....	6
1.5 Zona Laut.....	7
1.5.1 Zona Litoral.....	8
1.5.2 Zona Neritik.....	8
1.5.3 Zona Batyal	8
1.5.4 Zona Abysal.....	9
1.6 Zona Pemanfaatan Ruang Laut	9
1.6.1 Kegiatan Permukaan Laut.....	11
1.6.2 Kegiatan Kolom Laut.....	11
1.6.3 Kegiatan Dasar Laut	11

Bab 2 DINAMIKA OSEANOGRAFI12

2.1 Pengantar ke Oseanografi.....	12
2.2 Sifat Fisika Lautan	13
2.3 Kimia Lautan.....	15
2.4 Biologi laut	16
2.5 Geologi Lautan.....	18
2.6 Perubahan Iklim dan Oseanografi.....	19
2.7 Konservasi dan Perlindungan Lautan	21
2.8 Penelitian dan Teknologi Oseanografi.....	24

Bab 3 GEOGRAFI DAN TOPOGAFI LAUTAN27

Bab 4 KEANEKARAGAMAN BIOLOGI LAUT.....	42
4.1 Ekosistem Laut.....	42
4.2 Keanekaragaman Hayati Makro Laut.....	48
Bab 5 EKOSISTEM LAUT DANGKAL.....	52
5.1 Konsep Ekosistem Laut Dangkal.....	52
5.2 Ekosistem Estuari	53
5.3 Ekosistem Mangrove.....	55
5.3.1 Jenis-Jenis Mangrove	56
5.3.2 Fungsi dan Manfaat Hutan Mangrove	61
5.4 Ekosistem Lamun	62
5.5 Ekosistem Terumbu Karang.....	63
Bab 6 EKOSISTEM LAUT DALAM.....	66
6.1 Habitat Laut Dalam.....	66
6.1.1 Habitat Heterotrofik	68
6.1.2 Habitat Kemosintetik.....	71
6.2 Fauna Laut Dalam	73
6.2.1 Hewan Bertulang Belakang (Vertebrata).....	74
6.2.2 Hewan Tidak Bertulang Belakang (<i>Invertebrate</i>).....	79
6.3 Adaptasi Fauna Laut Dalam	81
6.3.1 Tekanan.....	81
6.3.2 Bioluminensi.....	82
6.3.3 Ukuran dan Bentuk tubuh.....	83
6.3.4 Penglihatan.....	84
6.3.5 Reproduksi.....	85
Bab 7 PEMANFAATAN SUMBER DAYA HAYATI LAUT.....	87
7.1 Rumput Laut.....	88
7.1.1 Agar	89
7.1.2 Alginat.....	90
7.1.3 Karagenan.....	90
7.1.4 Fucoxanthin	91
7.1.5 Budidaya	92
7.2 Ikan/Seafood.....	93
7.2.1 Produk Kulit Ikan	95

7.2.2	Organ Usus dan Visceral.....	95
7.2.3	Hormon Perkembangbiakan yang Diinduksi Ikan.....	96
7.2.4	Berbagai Produk Biokimia dan Farmasi	97
7.2.5	Produk Sisik Ikan/Cangkang.....	97
7.2.6	Produk dari Ikan.....	98
7.2.7	Produk Tulang Ikan.....	99
7.2.8	Produk Turunan Multisumber	100
7.2.9	Produk ikan utuh.....	101
7.3	Lamun.....	102
7.4	Mangrove.....	102

Bab 8 PEMANFAATAN SUMBER DAYA NON-HAYATI LAUT ...104

8.1	Pendahuluan	104
8.2	Jenis Sumber Daya Non-Hayati Laut.....	105
8.2.1	Mineral dan Tambang	105
8.2.2	Energi	107
8.2.3	Ruang Bawah Laut.....	107
8.3	Dampak Lingkungan dan Upaya Pelestarian	109
8.3.1	Dampak Eksploitasi Sumber Daya Non Hayati Laut terhadap Lingkungan.....	109
8.3.2	Upaya Pelestarian dan Pengelolaan Berkelanjutan ...	111
8.4	Masa Depan Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut..	113
8.4.1	Tren dan Perkembangan dalam Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut.....	113
8.4.2	Implikasi Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan dari Pertumbuhan Sektor Ini	114
8.5	Kesimpulan	115
8.5.1	Peneguhan Pentingnya Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut secara Berkelanjutan	115
8.5.2	Tantangan dan Peluang di Masa Depan untuk Pengembangan Lebih Lanjut.....	116

Bab 9 PENGELOLAAN LINGKUNGAN RUANG AIR.....117

9.1	Informasi Daya Dukung dan Daya Tampung Air Nasional .	118
9.2	Konsep Daya Dukung Air	119
9.2.1	Air Permukaan.....	121

9.2.2	Air Bawah Tanah	122
9.3	Regulasi Perencanaan untuk Daya Dukung Air.....	123
9.4	Daya Dukung Lingkungan dan Hubungannya dengan Perkembangan Kota yang Terus Berlanjut.....	124
9.5	Estimasi Kebutuhan Air di Kota.....	126
9.5.1	<i>Mathematical Method</i>	127
9.5.2	Metode Linier yang Menggunakan Aritmatik dan Geometrik	127
9.6	Kebutuhan Air untuk Industri.....	129
 Bab 10 PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP LINGKUNGAN RUANG LAUT.....132		
10.1	Pendahuluan	132
10.2	Dampak Perubahan Iklim Terhadap Komponen Ruang Laut	134
10.3	Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ekosistem Ruang Laut	137
10.4	Dampak Ekonomi dan Sosial Perubahan Iklim di Ruang Laut	140
10.5	Upaya Adaptasi dan Mitigasi Dampak Perubahan Iklim di Ruang Laut	144
10.6	Kesimpulan dan Prospek.....	148
 Bab 11 PENCEMARAN LAUT: SUMBER, DAMPAK DAN PENANGGULANGANNYA150		
11.1	Definisi dan Sumber Pencemaran Laut	150
11.1.1	Definisi Pencemaran Laut.....	150
11.1.2	Sumber Pencemaran Laut.....	151
11.2	Dampak Pencemaran Laut dan Penanggulangannya.....	158
11.2.1	Dampak Pencemaran Laut.....	158
11.2.2	Penanggulangan Pencemaran Laut	161
 Bab 12 KONSERVASI DAN PELESTARIAN LINGKUNGAN RUANG LAUT165		
12.1	Mengapa Konservasi Sumber Daya dan Ruang Laut Diperlukan?.....	165

12.1.1	Permasalahan Pemanfaatan Sumber Daya Alam	165
12.1.2	Perlunya Kawasan Konservasi dan Ruang Laut.....	166
12.2	Ekologi Penting Sumber Daya Laut Pesisir	169
12.2.1	Batasan Wilayah Pesisir	170
12.2.2	Ekosistem Mangrove	171
12.2.3	Produksi Hutan Bakau	172
12.2.4	Keanekaragaman Jenis Mangrove dan Distribusinya	174
12.2.5	Ekosistem Padang Lamun	175
12.2.6	Ekosistem Terumbu Karang.....	178
12.2.7	Kegiatan yang Merusak Sumber Daya Pesisir dan Laut	184

Bab 13	PERAN KOMUNITAS LOKAL DALAM PENGELOLAAN LINGKUNGAN RUANG LAUT.....	192
13.1	Peran Komunitas Lokal.....	192
13.2	Peran Komunitas Lokal Wilayah Pesisir dalam pengelolaan Lingkungan Laut	198
13.3	Peran Komunitas sebagai Agen konservasi Lingkungan Laut	199
13.4	Kesimpulan	203

Bab 14	TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PELESTARIAN LINGKUNGAN RUANG LAUT.....	204
14.1	Teknologi Pemantauan Lingkungan Laut	204
14.1.1	Satelit Pemantauan Laut	204
14.1.2	Sensor dan Alat Pemantau Bawah Air	208
14.1.3	Penggunaan ROV (<i>Remotely Operated Vehicles</i>) dalam Penelitian Lingkungan Bawah Air.....	210
14.1.4	Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Pemodelan.....	212
14.2	Teknologi dalam Konservasi Biota Laut.....	215
14.2.1	Teknologi Pembibitan dan Pemulihan Populasi.....	215
14.2.2	Program Reintroduksi Spesies dalam Pelestarian Biota Laut.....	216
14.2.3	Proteksi Habitat dengan Teknologi	218
14.2.4	Penggunaan <i>Drone</i> dalam Konservasi.....	220
14.3	Teknologi Pengelolaan Sumber Daya Laut	223

14.3.1	Sistem Manajemen Perikanan Berkelanjutan	223
14.3.2	Inovasi dalam Budidaya Laut	225
14.3.3	Pemanfaatan Energi Terbarukan di Laut.....	228
14.4	Teknologi Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran Laut	231
14.4.1	Teknologi Pengumpulan Sampah Laut.....	231
14.4.2	Teknologi Bioremediasi.....	234
14.4.3	Pengolahan Limbah dengan Teknologi Canggih.....	237
DAFTAR PUSTAKA.....		241
BIODATA PENULIS		2744

DAFTAR TABEL

7.1 Sebaran (%) produksi budidaya rumput laut.....	92
7.2 Budidaya rumput laut dan perkiraan produksi (ribu ton, FW)	92
7.3 Jumlah insulin ditemukan pada beberapa ikan	96
9.1 Peraturan Perundang-Undangan tentang Cakupan Daya Dukung Air	124
9.2 Standar konsumsi air untuk kebutuhan industri	130
11.1 Berbagai jenis logam dan konsentrasi rata-rata yang terkandung dalam air laut	152
11.2 Beberapa kasus tumpahan minyak di perairan dunia	155
11.3 Beberapa contoh aktivitas perikanan yang menyebabkan pencemaran laut dan kerusakan ekosistem terumbu karang.....	156
12.1 Spesies endemik pulau-pulau di Indonesia	167
12.2 Kawasan Konservasi di Indonesia 2023.....	169
12.3 Produktivitas primer mangrove di beberapa wilayah pesisir Pasifik dan Atlantik	173
12.4 Bahan-bahan pencemar di lingkungan laut	185
13.1 Tujuan Program Prioritas Ekonomi Biru.....	200

DAFTAR GAMBAR

1.1 Ekosistem Pesisir	2
1.2 Profil Zona Laut	7
1.3 Kegiatan di Ruang Laut (a) dan Pemanfaatan Ruang pada Zona Perikanan Tangkap (b)	10
3.1 Distribusi Samudera di Dunia	28
3.2 Samudera Arktik	29
3.3 Dasar Samudra Arktik	31
3.4 Samudra Selatan	32
3.5 Dasar Samudra Selatan	33
3.6 Samudra Hindia	34
3.7 Dasar Samudra Hindia	36
3.8 Samudra Atlantik	38
3.9 Dasar Samudra Atlantik	39
3.10 Samudra Pasifik	40
3.11 Dasar Samudra Pasifik	41
5.1 Jenis Mangrove Avicennia	57
5.2 Jenis Mangrove Sonneratia	58
5.3 Jenis Mangrove Ceriops	59
5.4 Jenis Mangrove Bruguiera	60
5.5 Jenis Mangrove Rhizophora	60
5.6 Produksi Organisme Akuatik Secara Global	64
6.1 Pembagian Zonasi Laut Secara Vertical dan Horizontal	67
6.2 Persentase Kedalaman Lautan Dunia	67
6.3 Ngarai di Laut Catalan	69
6.4 Madrepora oculata (a); Lophelia pertusa (b)	70
6.5 Riftia pachyptila	72
6.6 Lamellibranchia columna	73
6.7 Beberapa Organisme Invertebrata Laut Dalam Crinoids (Florometra serratissima) (A); Basket stars (Gorgonocephalus eucnemis) (B); Brittle stars (Ophiacantha spp.) (C); Brachiopods (Terebratulida) (D)	74
6.8 Morfologi Fosil Myxiniela siroka	75
6.9 Ikan Cladoselache	76

6.10	<i>Apristurus microps</i>	72
6.11	<i>Histiobranchus bathybius</i>	72
6.12	<i>Micromisistius poutassou</i>	78
6.13	<i>Benthothuria funebris</i> (E-F) dan <i>Paroriza pallens</i> (G-H)	80
5.14	Krustasea laut dalam	
	<i>AcanthePHYra purpurea</i> (C); <i>Janicella spinicauda</i> (D); <i>Systellaspis debilis</i> (E); <i>Plesionika rosignoli</i> (F); <i>Pasiphaea multidentate</i> (G); <i>Funchalia villosa</i> (H).....	81
6.15	Bioluminensi pada Ikan	83
6.16	Bentuk tubuh ikan laut dalam yang memanjang <i>Nemichythus scolopaceus</i> (a); <i>Halosauropsis machrochir</i> (b)	84
6.17	Perbedaan Ukuran Mata Ikan Laut Dalam <i>Myctophum brachygnathum</i> (A) dan Ikan Pelagis <i>Nannobrachium phyllisae</i> (B)	85
6.18	Ikan Ceratioid Jantan (Tanda Panah) Bersifat Parasit pada Ikan Betina	86
7.1	Aplikasi Kandungan Rumput Laut dan Bioaktivitasnya	88
7.2	Nutrisi pada Ikan/Seafood	93
7.3	Klasifikasi Produk Ikan Berdasarkan Bahan Bakunya	94
7.4	Aplikasi Kitosan	98
7.5	Pemanfaatan Bagian Tubuh Ikan	101
7.6	Jenis Mangrove dan Khasiat Secara Tradisional Farmakologis	103
8.1	Ilustrasi Penambangan Bawah Laut	106
8.2	Pencemaran Lingkungan Laut	110
9.1	Peta Daya Dukung Air	118
9.2	Konsep Kerjasama Antar Stekholder dalam Pembangunan Infrastruktur	121
9.3	Pencemaran pada Air di Permukaan.....	122
9.4	Kerusakan Faktor Internal.....	125
9.5	Kerusakan Faktor Eksternal	126
11.1	Beberapa Sumber Utama Terjadinya Pencemaran Laut	158
11.2	Beberapa Metode Penanggulangan Pencemaran Laut oleh Tumpahan Minyak	163
12.1	Peta Sebaran Kawan Konservasi Indonesia	168
12.2	Pembagian Wilayah Pesisir	170
12.3	Ekosistem Mangrove.....	172

12.4 Produktivitas Mangrove.....	173
12.5 Distribusi Mangrove di Indonesia.....	175
12.6 Ekosistem Padang Lamun.....	176
12.7 Produktivitas Padang Lamun.....	177
12.8 Distribusi Padang Lamun di Indonesia	178
12.9 Distribusi Terumbu Karang di Indonesia.....	179
12.10 Tipe Terumbu Karang.....	180
12.11 Produktivitas Terumbu Karang.....	181
12.12 Sebaran/Luasan Terumbu Karang di Indonesia	183
12.13 Dampak Aktivitas Manusia	185
12.14 Skema Sirkulasi Oksigen dan Unsur Hara	189
12.15 Dampak Aktivitas Pertanian Terhadap Lingkungan.....	190
12.16 Dampak Aktivitas Industri.....	191
13.1 Ciri Komunitas Lokal.....	196
13.2 Peran Komunitas Lokal	198
13.3 Kebijakan Ekonomi Biru.....	200

Bab 1

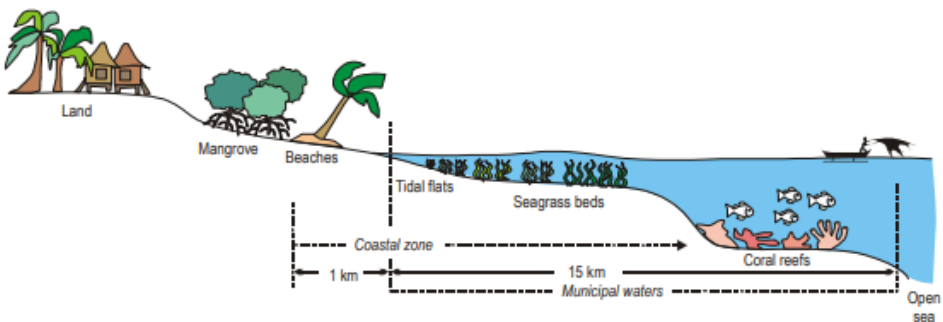
PENGENALAN LINGKUNGAN RUANG LAUT

Laut adalah suatu perairan luas setelah samudera yang mempunyai tingkatan, yaitu laut dalam, tengah, serta tepi. Menurut KBBI, “Laut adalah suatu perairan asin yang sangat luas yang menutupi bumi dan membaginya menjadi benua dan pulau-pulau” atau wilayah perairan yang memisahkan benua dan juga pulau-pulau besar dan pulau-pulau kecil. Laut yang merupakan sekumpulan air yang rasanya asin menutupi bumi kemudian membaginya menjadi benua dan pulau. Lautan merupakan perairan asin yang terus menerus menutupi daratan. Lautan yang dipisahkan benua atau pulau-pulau adalah campuran 96,5% dari air murni selebihnya 3,5% adalah bahan campuran seperti NaCl (garam), DO (Oksigen terlarut), N (Natrium) dan P (Posfor) atau bahan organik, serta partikel tidak dapat larut dalam air.

Air laut dengan campuran 95% air murni memiliki banyak sekali manfaat dan kegunaan yang berguna bagi seluruh manusia di muka bumi serta makhluk hidup dalam memenuhi kebutuhan sehari-hari, oleh sebab itu laut memiliki banyak kandungan yang memberikan kelimpahan pada sumber daya perairan, seperti ikan dan biota laut lainnya yang mampu menunjang segala kebutuhan manusia. Pemanfaatan dan kegunaan laut menjadi semakin luas ketika memasuki abad ke-20 dengan temuan beranekaragam bahan yang dapat digunakan dalam penggunaan pertambangan dan tingginya pengetahuan manusia dalam pengeboran untuk menemukan minyak dan gas alam di dasar laut, hal ini menjadikan meluasnya pemanfaatan dan juga perlu adanya upaya dalam ekstraksi pada sumber daya kelautan (Rahmadhani, 2022).

1.1 Ekosistem Laut

Ekosistem laut adalah lingkungan perairan dengan kadar garam terlarut yang tinggi, seperti yang terdapat di dalam atau dekat laut. Ekosistem laut ditentukan oleh faktor biotik (hidup) dan abiotik (tak hidup) yang unik. Faktor biotik meliputi tumbuhan, hewan, dan mikroba. Faktor biotik yang penting meliputi jumlah sinar matahari dalam ekosistem, jumlah oksigen dan nutrisi terlarut dalam air, kedekatan dengan daratan, kedalaman, dan suhu. Sinar matahari merupakan salah satu faktor abiotik terpenting bagi ekosistem laut.



Gambar 1.1 Ekosistem Pesisir

(Sumber: Philippine Coastal Ecosystems, 2017)

Beberapa jenis ekosistem laut sebagian besar disepakati: muara, rawa asin, hutan bakau, terumbu karang, laut terbuka, dan laut dalam (**Gambar 1.1**). Muara adalah wilayah pesisir tempat bertemunya lautan dengan sungai. Di sini, nutrisi dan garam dari laut bercampur dengan nutrisi dan garam dari sungai di daerah yang terlindung dari cuaca ekstrim. Oleh karena itu, muara merupakan salah satu tempat paling produktif di bumi dan mendukung berbagai jenis kehidupan. Selain itu, karena terletak di pertemuan sungai dengan lautan, muara secara tradisional mendukung banyak komunitas manusia dan aktivitas seperti penangkapan ikan, pelayaran, dan transportasi. Sedangkan muara terbentuk di pertemuan lautan dengan sungai, rawa asin terjadi ketika lautan bertemu dengan daratan. Tempat-tempat ini kaya akan nutrisi dari sedimen yang dibawa oleh laut. Rawa sering tergenang air pasang, membuat tanah di sekitarnya basah dan asin. Akibatnya, tanah

kekurangan oksigen dan dipenuhi bahan-bahan yang membusuk. Ekosistem ini didominasi oleh semak dan rerumputan yang tumbuh rendah.

Ekosistem pesisir lainnya adalah hutan bakau. Hutan mangrove terdapat di daerah tropis. Ekosistem ini sering kali dibanjiri air laut, sehingga akar pohon bakau tenggelam. Sistem akar bakau menyaring garam dan berada di atas tanah untuk mengakses oksigen. Pohon-pohon ini menyediakan rumah bagi berbagai spesies. Satwa seperti ikan, kepiting, udang, reptil, dan amfibi hidup di antara akar-akar bakau dan kanopinya menjadi tempat bersarang bagi burung. Sedikit lebih jauh ke laut tropis terdapat terumbu karang, ekosistem zona eufotik yang dibangun dari kerangka luar yang disekresikan oleh polip karang. Kerangka luar ini membentuk struktur kompleks yang melindungi banyak organisme berbeda. Terumbu karang adalah ekosistem yang sangat beragam yang menjadi rumah bagi spons, krustasea, moluska, ikan, penyu, hiu, lumba-lumba, dan banyak lagi makhluk lainnya.

Berdasarkan perhitungan tertentu, terumbu karang merupakan seperempat dari seluruh spesies laut. Di luar terumbu karang terdapat lautan terbuka. Ekosistem laut terbuka sangat bervariasi seiring dengan perubahan kedalaman laut. Di permukaan laut, zona eufotik, ekosistem menerima banyak cahaya dan oksigen, cukup hangat, dan mendukung banyak organisme fotosintetik. Banyak organisme yang kita kaitkan dengan ekosistem laut, seperti paus, lumba-lumba, gurita, dan hiu, hidup di laut terbuka. Seiring bertambahnya kedalaman lautan, lautan menjadi semakin gelap, dingin, dan ketersediaan oksigen semakin sedikit. Organisme yang hidup di ekosistem laut dalam di zona disfotik dan afotik memiliki adaptasi yang tidak biasa yang membantu mereka bertahan hidup di lingkungan yang menantang ini. Beberapa organisme memiliki mulut yang sangat besar sehingga memungkinkan mereka menangkap nutrisi apa pun yang jatuh dari kedalaman laut yang lebih dangkal. Yang lain telah beradaptasi untuk mendapatkan energinya melalui kemiosintesis bahan kimia dari ventilasi hidrotermal.

1.2 Ekosistem Mangrove

Mangrove adalah berbagai spesies pohon berdaun lebar (tinggi 10–40 kaki) yang terletak di sungai berlumpur dan muara pasang surut.

Mereka terletak di zona perantara antara daratan dan lautan dan mewakili salah satu contoh *ecotone* terbaik. Mereka membutuhkan air garam yang hangat sehingga mereka terletak di sepanjang garis pantai tropis. Tumbuhan bakau bertahan hidup di zona air asin antara air dan daratan (Iqbal, 2022).

Mangrove memiliki peranan penting, antara lain:

- Hutan bakau memberikan dukungan kokoh terhadap garis pantai dengan meminimalkan erosi akibat gelombang badai, arus, gelombang, dan pasang surut. Sistem akar mangrove yang rumit sangatlah unik karena memungkinkan mangrove menjadi tempat berlindung bagi ikan dan organisme lain dalam lingkungan yang ramah lingkungan.
- Mangrove adalah garis pertahanan pertama melawan angin topan dan naiknya air laut .
- Hutan bakau menyediakan tempat bersarang dan berkembang biak yang penting bagi ikan dan kerang, burung migran, dan penyu
- Mangrove juga berperan sebagai penyerap karbon yang besar .
- Mangrove dimanfaatkan untuk kayu, pertambangan, pertanian, pembangunan pelabuhan dan pemukiman manusia
- Mengontrol/mengurangi erosi tanah. Hal ini meningkatkan produktivitas perikanan di perairan pesisir yang berdekatan. Hal ini terjadi karena kawasan ini berfungsi sebagai tempat berkembang biaknya ikan, udang, dan kepiting yang bernilai komersial. Selain itu, mereka memasok nutrisi organik dan anorganik. Mereka juga kaya akan keanekaragaman hayati dan bertindak sebagai habitat satwa liar.
- Akar mangrove yang sangat rumit dan terstruktur mendorong terperangkapnya sedimen (misalnya dari sungai) dan sampah organik yang membantu mangrove menyesuaikan diri dengan kenaikan permukaan air laut, sehingga menjadikannya sangat berharga dalam mendukung pesisir yang berketahanan iklim.
- Mangrove menciptakan keanekaragaman habitat yang sangat baik karena menggabungkan spesies hewan dari lingkungan darat dan laut dalam satu ekosistem. Kelompok utama berkisar dari serangga, moluska dan krustasea hingga ikan, reptil, burung dan mamalia.

1.3 Ekosistem Lamun

Lamun hidup di perairan dekat pantai di sebagian besar benua di dunia. Mereka adalah makanan utama duyung dan penyu hijau serta menyediakan habitat bagi banyak hewan laut yang lebih kecil, beberapa di antaranya, seperti udang dan ikan, mempunyai nilai komersial yang penting. Mereka juga menyerap nutrisi dari limpasan pantai dan menstabilkan sedimen, membantu menjaga air tetap jernih. Lamun memiliki banyak manfaat, antara lain:

- Lamun adalah “insinyur ekosistem”.

Menurut Australian Governments Lamun dapat menciptakan atau mengubah lingkungannya secara signifikan dan menyediakan habitat mikro yang sebelumnya tidak ada. Misalnya, mereka menyerap karbon dioksida – memperbaiki kondisi kimiawi spesies yang terkena dampak pengasaman laut – dan melepaskan oksigen, yang dibutuhkan hewan laut untuk bernapas. Akar lamun yang kusut menstabilkan sedimen laut, dan kanopi tanaman menyediakan perlindungan dan tempat berkembang biak bagi ratusan spesies.

- Dua puluh persen perikanan terbesar di dunia bergantung pada lamun.

Lamun menyediakan kanopi bawah air yang rindang yang menjadi tempat berlindung bagi invertebrata dan ikan muda. Para ahli memperkirakan bahwa seperlima spesies ikan yang paling banyak mendarat di dunia menggunakan lamun sebagai daerah pembibitan, termasuk banyak spesies yang penting secara komersial. Tanpa habitat penting ini, jumlah ikan yang bisa ditangkap akan berkurang dan mata pencaharian bisa hilang.

- Lamun secara alami meningkatkan kejernihan air.

Daun lamun memperlambat aliran air, menyebabkan sedimen dan partikel tersuspensi lainnya cepat mengendap. Akar lamun juga menstabilkan sedimen laut. Jasa ekologis ini meningkatkan kejernihan air dan mengurangi erosi pantai.

- Lamun menangkap dan menyimpan karbon.

Melalui fotosintesis, lamun menghilangkan karbon dioksida dari air dan menggunakan karbon tersebut untuk membangun daun dan akarnya. Bahan tanaman yang terkumpul pada sedimen rendah

oksigen di dasar laut terurai jauh lebih lambat dibandingkan di darat. Ketika karbon ini perlahan-lahan membusuk, ia terperangkap dan akhirnya terkubur di dalam tanah di bawahnya. Faktanya, para ilmuwan memperkirakan 10% dari total karbon organik yang tersimpan di lautan terkubur di tanah di bawah padang lamun.

- Lamun membantu melindungi garis pantai.
Padang lamun menjadi penyangga masyarakat pesisir dari dampak gelombang laut dan melindungi garis pantai dari erosi, dua hal yang menjadi semakin berharga seiring dengan meningkatnya frekuensi dan tingkat keparahan badai.
- Lamun adalah solusi berbasis alam terhadap perubahan iklim.
Dengan menyerap karbon dan melindungi garis pantai, lamun dapat membantu masyarakat melakukan mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Padang lamun yang sehat merupakan solusi berbasis alam terhadap berbagai ancaman yang dihadapi perairan pesisir dan masyarakat, termasuk perubahan iklim. Pemerintah harus melindungi dan memulihkan ekosistem utama ini sebagai bagian dari kebijakan perubahan iklim mereka (Baez, 2021).

1.4 Ekosistem Terumbu Karang

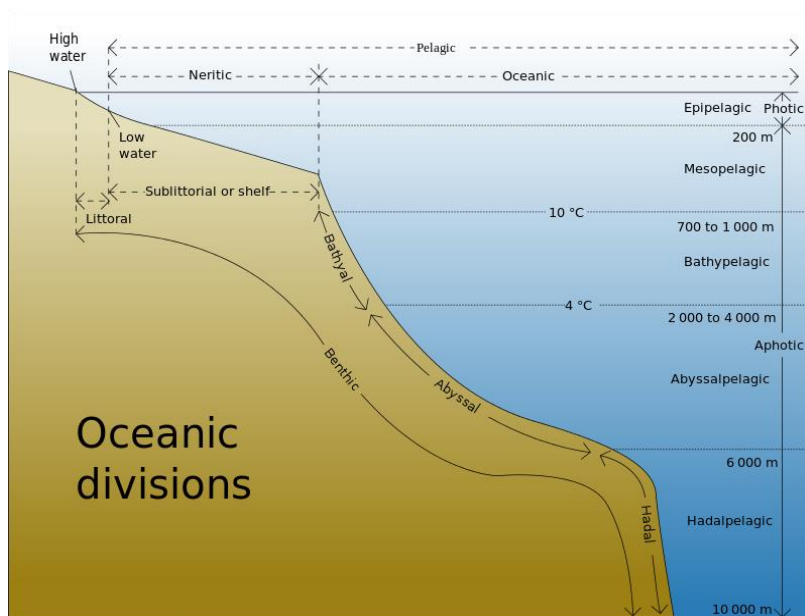
Terumbu karang adalah salah satu ekosistem yang paling beragam di dunia. Polip karang, hewan yang terutama bertanggung jawab membangun terumbu, dapat mempunyai berbagai bentuk: koloni pembentuk terumbu besar, kipas yang mengalir dengan anggun, dan bahkan organisme kecil yang menyendiri. Ribuan spesies karang telah ditemukan; beberapa hidup di laut tropis yang hangat, dangkal, dan lainnya di kedalaman laut yang dingin dan gelap. Setiap individu karang disebut sebagai polip. Polip karang hidup dari kerangka luar kalsium karbonat nenek moyangnya, menambahkan kerangka luarnya sendiri ke dalam struktur karang yang ada. Seiring berlalunya waktu berabad-abad, terumbu karang berangsur-angsur tumbuh, kerangka luarnya yang sangat kecil, hingga menjadi fitur yang sangat besar di lingkungan laut. Karang ditemukan di seluruh lautan di dunia, mulai dari Kepulauan Aleutian di lepas pantai Alaska hingga perairan tropis hangat di Laut Karibia. Terumbu karang terbesar ditemukan di perairan jernih dan dangkal di daerah tropis dan subtropis. Sistem terumbu karang terbesar,

Great Barrier Reef di Australia, memiliki panjang lebih dari 1.500 mil (2.400 kilometer). Terumbu karang memiliki banyak manfaat, antara lain:

- Terumbu karang melindungi garis pantai dari badai dan erosi, menyediakan lapangan kerja bagi masyarakat lokal, dan menawarkan peluang rekreasi.
- Mereka juga merupakan sumber makanan dan obat-obatan baru.
- Lebih dari setengah miliar orang bergantung pada terumbu karang untuk makanan, pendapatan, dan perlindungan.
- Memancing, menyelam, dan snorkeling di dan dekat terumbu karang menambah ratusan juta dolar bagi bisnis lokal.
- Nilai ekonomi bersih terumbu karang dunia diperkirakan mencapai hampir puluhan miliar dolar AS per tahun.
- Ekosistem ini secara budaya penting bagi masyarakat adat di seluruh dunia (Adams, 2023).

1.5 Zona Laut

Zona laut terdiri dari beberapa zona, antara lain zona litoral, neritik, batyal, dan abysal. Profil zona laut dapat dilihat pada **Gambar 1.2**.



Gambar 1.2 Profil Zona Laut
(Sumber: Wikimedia, 2018)

1.5.1 Zona Litoral

Zona ini merupakan kawasan laut yang dibatasi oleh air surut dan air pasang. Saat air laut surut, kawasan ini akan menjadi daratan atau pantai. Oleh karena itu, ketika air laut naik maka kawasan ini akan terendam banjir. Zona pesisir laut terletak di antara garis air surut dan garis air pasang atau disebut juga zona intertidal (Adlani, 2021).

Di kawasan pantai anda dapat menjumpai beberapa spesies seperti udang, kepiting, bintang laut dan juga cacing, karena suhu terik matahari yang sangat menyengat. Dalam kehidupan sehari-hari, masyarakat biasanya memanfaatkan kawasan pantai untuk tambak garam, pemanfaatan hutan bakau, serta wisata pantai karang.

1.5.2 Zona Neritik

Laut wilayah neritik merupakan laut dangkal dengan kedalaman berkisar antara 150 hingga 200 meter. Kedalaman ini masih tergolong dangkal. Di kawasan ini sinar matahari masih dapat menembus dasar laut sehingga fotosintesis dapat berlangsung dengan baik. Wilayah laut dangkal kaya akan berbagai jenis ikan dan tumbuhan laut. Selain itu, ada organisme planktonik yang tumbuh subur karena oksigen masih melimpah (Nailufar, 2022). Di kawasan ini juga terdapat gelombang yang menyebabkan plankton menyebar ke seluruh perairan. Plankton merupakan komponen makanan utama ikan. Di Indonesia, contoh laut zona neritik antara lain Laut Jawa, Laut Natuna, Selat Malaka, dan laut sekitar Kepulauan Riau.

1.5.3 Zona Batyal

Daerah teras merupakan daerah perairan yang kedalamannya berkisar antara 200 sampai 2000 meter. Sinar matahari tidak dapat menembus area ini. Hal inilah yang membuat kehidupan di wilayah semu tidak seramai di wilayah neritik. Perairan dalam memiliki sedikit atau bahkan tidak ada kemampuan untuk menembus sinar matahari. Tidak ada produsen utama, sehingga jaring makanan menggunakan nutrisi dari perairan pelagis dan perairan tengah laut. Oksigen diperoleh dari siklus termohalin. Beberapa hewan yang masih bisa hidup di kawasan ini adalah hewan yang tidak memiliki mata. Selain jenis hewan tersebut,

kawasan ini juga memiliki hewan bermata seperti paus besar, hiu, cumi-cumi, dan gurita (Rohman, 2022)

1.5.4 Zona Abysal

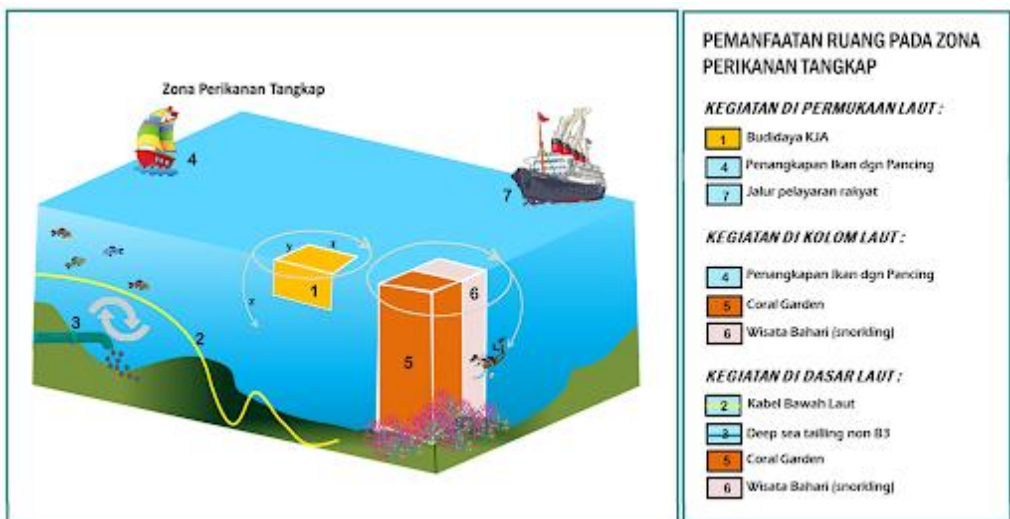
Zona abysal merupakan wilayah dasar laut yang kedalamannya lebih dari 2000 meter. Daerah ini disebut juga laut sangat dalam. Tekanan air lautnya memang besar, sehingga untuk menjelajahi kawasan ini memerlukan kapal selam khusus. Suhunya sangat dingin karena tidak ada sinar matahari yang masuk. Dalam kondisi gelap, hanya sedikit hewan yang mampu bertahan hidup, seperti *anglerfish* dan masih banyak hewan laut lainnya yang mampu mengeluarkan cahaya (Putri, 2022).

1.6 Zona Pemanfaatan Ruang Laut

Pengelolaan ruang laut pada ketiga jenis kegiatan laut yang dilakukan di wilayah permukaan, pilar, dan laut dalam memberikan banyak peluang dan tantangan, sehingga perlu perhitungan yang bijaksana agar tidak ada pihak yang dirugikan, baik wilayah yang dimanfaatkan maupun wilayah perairan bagi masyarakat yang tinggal di sana (Tarubali, 2023). Beberapa contoh kegiatan pemanfaatan ruang laut dapat dilihat pada **Gambar 1.3**.



(a)



(b)

Gambar 1.3 Kegiatan di Ruang Laut (a) dan Pemanfaatan Ruang pada Zona Perikanan Tangkap (b)
(Sumber: Tarubali, 2023)

1.6.1 Kegiatan Permukaan Laut

1. Budidaya KJA (Kapal Jaring Apung) merupakan kegiatan masyarakat yang memanfaatkan jaring-jaring yang dikaitkan pada kapal yang mengapung di permukaan laut untuk menangkap ikan.
2. Menangkap ikan dengan pancing merupakan sebuah cara yang paling sering dilakukan masyarakat untuk menangkap ikan.
3. Jalur pelayaran kapal yang menjadi kegiatan pada permukaan laut. Jalur ini di tempuh oleh masyarakat yang berkepentingan untuk mengakses perairan laut seperti nelayan dan moda transportasi penyebrangan lintas daerah.

1.6.2 Kegiatan Kolom Laut

1. Penangkapan ikan menggunakan pancing masih terjadi pada kolom laut dngan jeni ikan yang berbeda.
2. *Coral garden* yang sering ditemui pada kegiatan rehabilitasi karang pada kolom laut yang sangat penting dalam ekologi laut.
3. Wisata bahari yang menjadi pusat perhatian para wisatawan luar untuk menjelajahi dunia bawah laut.

1.6.3 Kegiatan Dasar Laut

Infrastruktur yang dilakukan oleh kepetingan luas dengan menghubungkan kabel bawah laut sehingga mendukung konektivitas jaringan dan pertumbuhan ekonomi di setiap daerah.

Bab 2

DINAMIKA OSEANOGRAFI

2.1 Pengantar ke Oseanografi

Oseanografi, sebagai cabang ilmu yang mempelajari lautan, menawarkan pemahaman yang mendalam tentang kompleksitas dan keberagaman ekosistem laut. Pengantar ini memberikan gambaran tentang ruang lingkup ilmu oseanografi, menyoroti pentingnya keterkaitan antara fenomena fisika, kimia, biologi, dan geologi laut dalam membentuk dinamika laut. Sebagai ilmu lintas disiplin, oseanografi membuka jendela ke dunia yang luas dan masih belum sepenuhnya dipahami. Melalui pendekatan holistik, oseanografi memungkinkan kita untuk menjelajahi kompleksitas laut dan memahami dampaknya terhadap manusia dan lingkungan.

Pentingnya oseanografi sebagai ilmu multidisiplin tercermin dalam kerangka kerja penelitian yang luas yang diperlukan untuk memahami dinamika laut. Menurut studi Thompson *et al.* (2018), pendekatan multidisiplin dalam penelitian oseanografi memungkinkan kita untuk mengintegrasikan data dari berbagai bidang ilmu untuk memahami peran laut dalam sistem bumi secara menyeluruh. Melalui penelitian ini, para ilmuwan telah mengidentifikasi hubungan kompleks antara faktor-faktor fisika, kimia, biologi, dan geologi yang mempengaruhi pergerakan dan interaksi laut.

Fenomena fisika laut, seperti arus laut, suhu air, dan pergerakan gelombang, menjadi fokus utama dalam pemahaman dinamika oseanografi. Menurut Smith *et al.* (2019), pemahaman tentang arus laut dan sirkulasi termal sangat penting dalam memprediksi perubahan iklim global dan mengidentifikasi pola pergerakan organisme laut. Selain itu, fenomena geologi laut, seperti tektonika lempeng dan pembentukan

struktur dasar laut, juga memainkan peran penting dalam membentuk morfologi dasar laut dan menentukan distribusi sumber daya mineral.

Kimia laut merupakan aspek lain dari oseanografi yang tidak kalah pentingnya. Studi oleh Johnson *et al.* (2020) menyoroti pentingnya pemahaman tentang kualitas air laut, termasuk konsentrasi garam, oksigen terlarut, dan nutrisi, dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Perubahan dalam komposisi kimia laut dapat mempengaruhi kesehatan dan keanekaragaman hayati laut, serta berdampak pada kesejahteraan manusia yang bergantung pada sumber daya laut.

Bidang oseanografi yang terkait erat dengan kehidupan laut adalah biologi laut. Anderson *et al.* (2021) menyoroti peran penting fitoplankton, zooplankton, dan organisme laut lainnya dalam rantai makanan laut dan ekosistem laut secara keseluruhan. Pemahaman tentang interaksi antara organisme laut dan lingkungan mereka menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan sumber daya laut dan mengelola perikanan secara berkelanjutan. Selain itu, pemahaman tentang interaksi antara laut dan atmosfer juga merupakan bagian penting dari oseanografi. Studi oleh Thompson dan Brown (2018) menekankan pentingnya memahami pola pergerakan udara dan aliran angin dalam memprediksi cuaca laut dan mengevaluasi dampaknya terhadap navigasi maritim dan aktivitas manusia lainnya di laut.

Peran oseanografi dalam menjelajahi tantangan global seperti perubahan iklim, peningkatan konservasi sumber daya laut, dan mitigasi bencana alam juga menjadi fokus utama penelitian dalam bidang ini. Menurut Garcia *et al.* (2021), pengembangan solusi inovatif untuk mengatasi tantangan global dalam oseanografi memerlukan kolaborasi lintas disiplin dan pendekatan holistik.

2.2 Sifat Fisika Lautan

Studi tentang sifat fisika lautan adalah kunci dalam memahami dinamika pergerakan dan interaksi di dalamnya. Fenomena fisika laut mencakup berbagai aspek, mulai dari arus laut hingga perubahan suhu dan salinitas air. Melalui pemahaman yang mendalam tentang sifat fisika laut, kita dapat mengungkap pola pergerakan air laut, distribusi panas, dan faktor-faktor lain yang memengaruhi kehidupan laut dan aktivitas manusia di laut. Dalam bab ini, kita akan menjelajahi berbagai aspek fisika

lautan, dari arus laut yang besar hingga fenomena mikroskopis yang memengaruhi sirkulasi global.

Salah satu aspek penting dari fisika laut adalah pemahaman tentang arus laut. Arus laut merupakan pergerakan massa air di lautan yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk angin, perbedaan suhu dan salinitas, serta topografi dasar laut. Menurut Wang *et al.* (2019), pemahaman yang baik tentang arus laut sangat penting dalam navigasi maritim, pengelolaan sumber daya laut, dan pemodelan perubahan iklim global. Arus laut juga memainkan peran penting dalam mendistribusikan panas di seluruh dunia, mempengaruhi iklim regional dan global.

Selain arus laut, sifat termal laut juga merupakan aspek penting dari fisika lautan. Perubahan suhu air laut dapat mempengaruhi pola pergerakan arus laut dan distribusi organisme laut. Studi oleh Garcia dan Smith (2020) menyoroti pentingnya sirkulasi termal laut dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut dan mengatur distribusi nutrisi di lautan. Variasi suhu laut juga dapat mempengaruhi pola cuaca regional dan global, memengaruhi siklus hidrologi dan perubahan iklim.

Selain suhu, salinitas atau kadar garam dalam air laut juga memainkan peran penting dalam fisika laut. Perbedaan salinitas dapat mempengaruhi densitas air laut, yang pada gilirannya memengaruhi sirkulasi laut dan pola arus laut. Menurut Johnson *et al.* (2021), perubahan salinitas laut dapat memicu fenomena seperti terbentuknya aliran termohalin, yang memainkan peran penting dalam sirkulasi global dan distribusi panas di lautan. Variasi salinitas juga dapat mempengaruhi pertumbuhan dan distribusi organisme laut, serta kualitas air untuk kebutuhan manusia.

Selain faktor-faktor fisika yang besar seperti arus laut, suhu, dan salinitas, ada juga fenomena mikroskopis yang memengaruhi dinamika laut. Contohnya adalah fenomena turbulensi, yang merupakan gerakan berputar dan bergerak secara acak di dalam air laut. Studi oleh Chen *et al.* (2020) menyoroti peran turbulensi dalam pencampuran air laut, transportasi nutrisi, dan distribusi organisme planktonik. Pemahaman tentang turbulensi laut juga penting dalam pengembangan model numerik untuk memprediksi dinamika lautan.

Selain itu, perubahan iklim global juga memiliki dampak signifikan terhadap fisika laut. Pemanasan global menyebabkan

pencairan es laut dan peningkatan suhu laut, yang memicu perubahan dalam sirkulasi termal laut dan pola arus laut. Menurut Brown dan Thompson (2018), perubahan iklim global dapat menyebabkan pergeseran dalam distribusi suhu dan salinitas laut, mempengaruhi ketersediaan habitat bagi organisme laut dan memicu perubahan dalam rantai makanan laut. Dengan demikian, pemahaman tentang interaksi antara fisika laut dan perubahan iklim sangat penting dalam memprediksi dampaknya terhadap ekosistem laut dan manusia.

2.3 Kimia Lautan

Kimia laut adalah cabang ilmu oseanografi yang mempelajari komposisi kimia air laut dan proses kimia yang terjadi di dalamnya. Dalam bab ini, kita akan menjelajahi berbagai aspek kimia laut, termasuk komposisi air laut, siklus biogeokimia, dan dampak aktivitas manusia terhadap kualitas air laut. Salah satu aspek utama dalam kimia laut adalah komposisi air laut itu sendiri. Air laut mengandung berbagai senyawa kimia, termasuk garam, karbonat, dan nutrisi esensial seperti nitrogen dan fosfor. Menurut Smith *et al.* (2018), pemahaman tentang komposisi kimia air laut penting dalam mengevaluasi kesehatan ekosistem laut dan memprediksi dampak perubahan lingkungan terhadap keanekaragaman hayati laut.

Selain itu, siklus biogeokimia merupakan aspek penting lainnya dalam kimia laut. Siklus ini mencakup proses alami di lautan yang mengatur distribusi dan transformasi unsur kimia, seperti karbon, nitrogen, dan fosfor. Menurut Johnson *et al.* (2019), pemahaman tentang siklus biogeokimia laut memungkinkan kita untuk memahami peran laut dalam siklus global materi dan regulasi iklim bumi.

Selain proses alami, aktivitas manusia juga memiliki dampak yang signifikan terhadap kimia laut. Limbah industri, polusi air, dan pertanian intensif dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi senyawa beracun di air laut. Studi oleh Garcia dan Brown (2020) menyoroti dampak negatif limbah industri terhadap kualitas air laut dan kesehatan ekosistem laut. Pemahaman tentang interaksi antara aktivitas manusia dan kimia laut memungkinkan kita untuk mengembangkan strategi pengelolaan yang lebih efektif untuk melindungi lingkungan laut.

Selain polusi kimia, perubahan iklim juga dapat memengaruhi kimia laut. Peningkatan suhu laut dan pencairan es laut dapat mempengaruhi keseimbangan asam-basa dalam air laut dan mengubah ketersediaan nutrisi bagi organisme laut. Menurut Thompson dan Anderson (2021), perubahan iklim global dapat menyebabkan peningkatan asidifikasi laut, yang dapat berdampak negatif terhadap organisme kalsium berlendir seperti karang dan kerangka.

Selain itu, pentingnya pengelolaan sumber daya laut juga menekankan pentingnya pemantauan kimia laut. Brown *et al.* (2018) menyoroti peran penting pengelolaan perikanan dalam memastikan kualitas air laut yang sehat dan keberlanjutan sumber daya laut. Strategi pengelolaan yang berbasis pada pemahaman tentang kimia laut dapat membantu mengurangi dampak negatif aktivitas manusia dan memastikan kelangsungan hidup organisme laut.

2.4 Biologi laut

Biologi lautan merupakan bidang studi yang mempelajari kehidupan di lautan, mulai dari organisme mikroskopis hingga mamalia laut yang besar. Pemahaman tentang biologi lautan memungkinkan kita untuk menghargai keindahan dan kompleksitas kehidupan laut serta mengidentifikasi strategi untuk melindungi dan memelihara keanekaragaman hayati laut. Lautan adalah rumah bagi jutaan spesies, mulai dari fitoplankton yang mikroskopis hingga ikan besar dan hewan laut megafauna seperti paus dan lumba-lumba. Menurut Smith *et al.* (2019), keanekaragaman hayati laut sangat penting untuk menjaga stabilitas ekosistem laut dan memberikan layanan ekosistem yang penting bagi manusia, seperti penyerapan karbon, produksi oksigen, dan sumber daya pangan. Pemahaman tentang keanekaragaman hayati laut merupakan langkah pertama dalam melindungi dan memelihara kehidupan laut.

Selain keanekaragaman, interaksi ekologi antarorganisme juga merupakan aspek penting dari biologi lautan. Organisme laut saling tergantung satu sama lain dalam sebuah jaring makanan kompleks, di mana predator memangsa mangsa dan biomassa disirkulasikan melalui rantai makanan. Garcia dan Anderson (2020) menyoroti peran penting plankton dalam jaring makanan laut dan kontribusinya terhadap

produksi primer di lautan. Pemahaman tentang interaksi ekologi ini membantu kita mengidentifikasi spesies kunci dan menjaga keseimbangan trofik di ekosistem laut.

Selain interaksi antarorganisme, adaptasi biologis juga menjadi fokus studi dalam biologi lautan. Organisme laut telah berevolusi untuk bertahan dalam lingkungan laut yang keras dan beragam, mengembangkan berbagai strategi adaptasi untuk mendapatkan makanan, berkembang biak, dan berkompetisi dengan organisme lain. Johnson *et al.* (2021) menyoroti adaptasi unik hewan laut, seperti kemampuan beberapa spesies ikan untuk mengubah warna kulit mereka untuk bersembunyi dari predator atau menarik pasangan saat kawin. Pemahaman tentang adaptasi biologis ini memberikan wawasan tentang keragaman kehidupan laut dan mekanisme evolusi yang mengarah ke spesiasi.

Selain adaptasi biologis, dinamika populasi juga menjadi fokus studi dalam biologi lautan. Faktor-faktor seperti tingkat kematian, kelahiran, migrasi, dan tekanan predasi mempengaruhi ukuran dan struktur populasi organisme laut. Menurut Thompson dan Brown (2019), pemahaman tentang dinamika populasi organisme laut penting untuk pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan dan memastikan kelangsungan hidup spesies yang terancam punah. Melalui pemantauan dan penelitian yang berkelanjutan, para ilmuwan dapat mengembangkan strategi pengelolaan yang efektif untuk mengatasi ancaman terhadap keberlanjutan sumber daya laut.

Selain studi tentang organisme hidup, biologi lautan juga mencakup penelitian tentang organisme mati dan siklus nutrisi di lautan. Proses dekomposisi organik oleh bakteri laut merupakan bagian penting dari siklus nutrisi di lautan, yang menghasilkan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan organisme planktonik. Brown *et al.* (2020) menyoroti peran penting bakteri laut dalam mendaur ulang nutrisi dan mempertahankan produktivitas primer di lautan. Pemahaman tentang siklus nutrisi laut penting untuk memahami kesehatan ekosistem laut dan menjaga produktivitas laut yang berkelanjutan.

2.5 Geologi Lautan

Geologi laut adalah bidang studi yang mempelajari struktur dan proses geologis yang terjadi di dasar laut. Salah satu aspek utama dalam geologi laut adalah struktur dasar laut. Dasar laut adalah permukaan bumi yang tersembunyi di bawah air laut, dan terdiri dari berbagai fitur seperti cekungan, pegunungan bawah laut, lembah, dan dataran. Menurut Smith *et al.* (2019), pemahaman tentang struktur dasar laut penting dalam pemodelan pergerakan arus laut, distribusi sedimen, dan penelitian sumber daya mineral bawah laut. Studi geologi laut memungkinkan kita untuk mengidentifikasi potensi sumber daya alam di dasar laut dan mengelola penggunaannya secara berkelanjutan.

Selain struktur dasar laut, aktivitas vulkanik bawah laut juga merupakan aspek penting dalam geologi laut. Banyak gunung bawah laut dan kawah vulkanik terletak di sepanjang punggung tengah samudra, tempat lempeng tektonik bertemu dan menyebabkan aktivitas vulkanik yang intensif. Studi oleh Garcia dan Johnson (2020) menyoroti kontribusi vulkanisme bawah laut terhadap pembentukan batuan baru, siklus nutrisi laut, dan habitat unik bagi kehidupan laut. Pemahaman tentang aktivitas vulkanik bawah laut memungkinkan kita untuk memahami evolusi dasar laut dan peranannya dalam ekosistem laut.

Selain aktivitas vulkanik, pembentukan gunung bawah laut juga merupakan fokus studi dalam geologi laut. Gunung bawah laut, juga dikenal sebagai *seamounts*, adalah fitur topografi yang signifikan di dasar laut, dan banyak dari mereka terbentuk melalui aktivitas vulkanik. Menurut Johnson *et al.* (2021), gunung bawah laut menyediakan habitat yang penting bagi kehidupan laut, dengan berbagai spesies yang hidup di sekitar puncak dan lerengnya. Studi tentang *seamounts* memungkinkan kita untuk memahami keragaman hayati di lautan dalam konteks geologi dan mengevaluasi perlindungan yang diperlukan terhadap ekosistem ini.

Selain gunung bawah laut, peran sedimen laut dalam membentuk dan mempengaruhi ekosistem laut juga penting untuk dipahami. Sedimen laut terdiri dari partikel-partikel kecil yang terendap di dasar laut, yang dapat berasal dari berbagai sumber seperti endapan sungai, material vulkanik, atau organisme laut yang mati. Brown dan Anderson (2018) menyoroti peran sedimen laut dalam menyediakan habitat bagi organisme benthik, mempertahankan ketersediaan nutrisi, dan merekam

jejak sejarah lingkungan laut. Pemahaman tentang distribusi dan karakteristik sedimen laut memungkinkan kita untuk memahami pola distribusi organisme laut dan dinamika ekosistem dasar laut.

Selain itu, studi tentang tektonik lempeng dan batuan laut juga merupakan bagian penting dari geologi laut. Tektonik lempeng merupakan teori yang menjelaskan gerakan lempeng bumi yang membentuk struktur geologis di dasar laut, seperti punggung tengah samudra, palung laut, dan cincin api Pasifik. Menurut Thompson *et al.* (2020), pemahaman tentang tektonik lempeng penting dalam memprediksi aktivitas gempa bumi dan letusan gunung berapi bawah laut, yang dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan laut dan manusia. Studi tentang batuan laut juga memberikan wawasan tentang sejarah geologis lautan dan evolusi bentang alam bawah laut.

Selain itu, geologi laut juga mempelajari fenomena geologi unik seperti sumber hidrotermal laut. Sumber hidrotermal laut adalah sistem panas yang terletak di dasar laut, di mana air laut bertemu dengan batuan panas di bawah kulit bumi. Studi oleh Garcia dan Smith (2019) menyoroti peran penting sumber hidrotermal laut dalam menyediakan habitat bagi organisme ekstremofil dan menyediakan nutrisi untuk ekosistem laut yang mendalam. Pemahaman tentang sumber hidrotermal laut memungkinkan kita untuk mengeksplorasi keterkaitannya dengan kehidupan laut dan potensi pemanfaatannya untuk ilmu pengetahuan dan industri.

2.6 Perubahan Iklim dan Oseanografi

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan terbesar yang dihadapi oleh planet kita saat ini, dan lautan memainkan peran kunci dalam memoderasi dan merespons perubahan tersebut. Dalam bab ini, kita akan menjelajahi bagaimana perubahan iklim mempengaruhi oseanografi, termasuk pemanasan global, peningkatan asidifikasi laut, kenaikan permukaan laut, dan dampaknya terhadap ekosistem laut dan manusia. Pemahaman tentang interaksi antara perubahan iklim dan oseanografi sangat penting untuk mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi yang efektif.

Salah satu aspek terpenting dari perubahan iklim adalah pemanasan global. Menurut Jones *et al.* (2018), lautan berperan sebagai

penyerap utama panas dari atmosfer, dan pemanasan global telah menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut yang signifikan selama beberapa dekade terakhir. Pemanasan ini memiliki dampak yang luas terhadap ekosistem laut, termasuk perubahan pola migrasi spesies, pemutihan karang, dan penurunan produktivitas laut.

Pemanasan global, perubahan iklim juga menyebabkan peningkatan asidifikasi laut. Karbon dioksida yang larut dalam air laut menyebabkan peningkatan kadar asam, yang berdampak negatif terhadap organisme laut yang memiliki kerangka kalsium, seperti terumbu karang dan moluska. Menurut Brown dan Smith (2019), asidifikasi laut dapat mengurangi kemampuan organisme laut untuk membentuk kerangka dan cangkang mereka, serta mengganggu ekosistem terumbu karang yang sensitif. Pemahaman tentang perubahan kimia laut ini penting untuk melindungi keanekaragaman hayati laut yang rentan terhadap perubahan lingkungan.

Selain itu, perubahan iklim juga menyebabkan kenaikan permukaan laut akibat pelelehan es gletser dan pencairan es laut. Kenaikan permukaan laut mengancam pulau-pulau kecil dan pesisir yang rendah, serta ekosistem pesisir yang penting bagi kehidupan manusia dan laut. Menurut Thompson dan Garcia (2020), kenaikan permukaan laut dapat menyebabkan banjir, intrusi air asin ke sungai dan akar tanaman, serta kerusakan habitat pesisir yang penting bagi biota laut dan manusia. Strategi mitigasi seperti pembangunan tanggul dan restorasi mangrove menjadi semakin penting dalam menghadapi ancaman ini.

Dampak langsungnya terhadap ekosistem laut, perubahan iklim juga memiliki dampak ekonomi dan sosial yang signifikan bagi masyarakat pesisir yang bergantung pada lautan untuk mata pencaharian mereka. Penurunan produktivitas perikanan, kerusakan terumbu karang, dan ancaman terhadap infrastruktur pesisir adalah beberapa contoh dampak negatif perubahan iklim terhadap masyarakat pesisir. Studi oleh Garcia *et al.* (2021) menyoroti pentingnya strategi adaptasi yang berkelanjutan untuk mengurangi kerentanan masyarakat pesisir terhadap perubahan iklim dan memperkuat ketahanan mereka terhadap ancaman yang dihasilkan.

Perubahan iklim juga memiliki dampak terhadap pola aliran laut, sirkulasi termohalin, dan pola cuaca laut. Perubahan ini dapat

mempengaruhi distribusi plankton, migrasi ikan, dan produktivitas primernya. Menurut penelitian oleh Johnson dan Brown (2019), perubahan pola aliran laut dapat memiliki dampak jangka panjang terhadap rantai makanan laut dan ekosistem yang bergantung padanya. Pemahaman tentang interaksi antara perubahan iklim dan dinamika oseanografi memungkinkan kita untuk memprediksi dampaknya terhadap kehidupan laut dan manusia serta mengembangkan strategi adaptasi yang sesuai.

Perubahan iklim juga dapat mempengaruhi siklus biogeokimia di lautan, termasuk siklus karbon, nitrogen, dan fosfor. Perubahan ini dapat mengganggu keseimbangan nutrisi di lautan dan mempengaruhi produktivitas primer serta ekosistem yang bergantung padanya. Studi oleh Brown *et al.* (2020) menyoroti pentingnya pemantauan dan pemodelan siklus biogeokimia untuk memahami respons lautan terhadap perubahan iklim dan mengembangkan strategi mitigasi yang efektif.

Perubahan iklim juga memiliki dampak terhadap ekosistem khusus seperti terumbu karang, padang lamun, dan ekosistem es laut. Menurut penelitian oleh Thompson *et al.* (2021), perubahan suhu, keasaman, dan ketersediaan nutrisi dapat mengancam keberlanjutan dan kelangsungan hidup ekosistem ini, yang penting bagi keanekaragaman hayati laut dan kesejahteraan manusia. Perlindungan ekosistem kritis ini menjadi semakin penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

2.7 Konservasi dan Perlindungan Lautan

Konservasi dan perlindungan lautan adalah tanggung jawab bersama yang diperlukan untuk memastikan kelangsungan hidup ekosistem laut yang kaya dan penting bagi kehidupan di Bumi. Pendekatan yang paling berdampak dalam konservasi lautan adalah pendirian kawasan konservasi laut yang terlindungi. Kawasan konservasi ini, seperti taman laut dan cagar alam laut, memainkan peran penting dalam melindungi keanekaragaman hayati laut dan ekosistem yang sensitif terhadap aktivitas manusia. Studi oleh Roberts *et al.* (2019) menekankan pentingnya pendirian kawasan konservasi laut yang terlindungi, menyatakan bahwa kawasan konservasi laut yang efektif adalah salah satu alat terpenting dalam memelihara ekosistem laut dan mengembalikan keseimbangan lingkungan laut yang terganggu.

Manajemen perikanan yang berkelanjutan juga merupakan aspek kunci dalam upaya konservasi lautan. Melalui penentuan kuota penangkapan yang berkelanjutan, pembatasan alat tangkap yang merusak, serta perlindungan spesies yang terancam punah, manajemen perikanan dapat membantu memastikan bahwa sumber daya ikan dapat dipertahankan untuk generasi masa depan. Studi oleh Garcia dan Brown (2020) menyatakan bahwa manajemen perikanan yang berkelanjutan adalah kunci untuk menjaga ekosistem laut yang sehat dan produktif, serta memastikan kelangsungan mata pencaharian bagi jutaan nelayan di seluruh dunia.

Pengendalian pencemaran laut juga menjadi prioritas dalam upaya konservasi dan perlindungan lautan. Pencemaran dari sumber-sumber seperti limbah industri, pertanian, dan domestik dapat merusak ekosistem laut dan membahayakan kehidupan laut. Penelitian oleh Thompson *et al.* (2021) menyoroti urgensi pengendalian pencemaran laut, mengemukakan bahwa pencemaran laut adalah ancaman serius bagi kesehatan ekosistem laut dan kesejahteraan manusia, dan tindakan segera diperlukan untuk mengurangi dampak negatifnya.

Pendidikan dan kesadaran masyarakat juga merupakan faktor kunci dalam upaya konservasi lautan. Melalui program pendidikan, kampanye penyuluhan, dan inisiatif partisipatif, masyarakat dapat diberdayakan untuk berperan aktif dalam menjaga kelestarian sumber daya laut. Penelitian oleh Brown dan Johnson (2018) menyoroti pentingnya pendidikan lingkungan dalam membangun kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga keberlanjutan lingkungan laut, menyatakan bahwa masyarakat yang teredukasi dan sadar lingkungan dapat menjadi agen perubahan dalam upaya konservasi lautan.

Penelitian dan pemantauan terus-menerus juga penting dalam mendukung upaya konservasi lautan. Melalui pemantauan kondisi ekosistem laut, penelitian ilmiah dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang dinamika populasi, kesehatan ekosistem, dan dampak perubahan lingkungan terhadap keanekaragaman hayati laut. Studi oleh Garcia *et al.* (2020) menyoroti peran penting pemantauan lingkungan dalam mendukung pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan, menyatakan bahwa pemantauan dan pemodelan lingkungan laut adalah instrumen penting dalam mengidentifikasi ancaman terhadap ekosistem

laut dan mengembangkan strategi mitigasi yang efektif. Penelitian oleh Roberts dan Thompson (2019) menekankan pentingnya kerjasama internasional dalam upaya konservasi lautan, mengatakan bahwa tindakan kolektif dari berbagai negara diperlukan untuk mengatasi tantangan global yang dihadapi oleh lautan kita.

Rehabilitasi dan restorasi ekosistem laut juga merupakan strategi penting dalam memulihkan kerusakan lingkungan laut yang sudah terjadi. Melalui program restorasi, seperti penanaman kembali terumbu karang, restorasi padang lamun, dan rehabilitasi habitat mangrove, upaya dapat dilakukan untuk mengembalikan fungsi ekosistem laut yang terganggu. Studi oleh Johnson *et al.* (2021) menyoroti pentingnya restorasi ekosistem laut dalam mengembalikan keanekaragaman hayati laut dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan lingkungan.

Perlindungan spesies terancam punah juga menjadi prioritas dalam upaya konservasi dan perlindungan lautan. Melalui upaya-upaya seperti penangkaran, pelestarian habitat, dan pengawasan penangkapan, upaya dapat dilakukan untuk mencegah kepunahan spesies laut yang rentan terhadap aktivitas manusia. Penelitian oleh Smith dan Garcia (2021) menyoroti pentingnya perlindungan spesies terancam punah dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Lebih lanjut dikemukakan bahwa penghentian penangkapan ilegal dan perlindungan habitat yang penting bagi kelangsungan hidup spesies terancam punah. Melalui penggunaan teknologi seperti sistem pemantauan satelit, sensor jaringan berbasis *Internet of Things (IoT)*, dan analisis data *big data*, upaya dapat dilakukan untuk memantau dan memahami dinamika ekosistem laut dengan lebih baik. Penelitian oleh Martinez *et al.* (2020) menyoroti peran teknologi dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas upaya konservasi laut yang menyatakan bahwa penggunaan teknologi terkini dapat membantu mengoptimalkan pengelolaan sumber daya laut dan memperkuat keberlanjutan ekosistem laut.

Dalam konteks perubahan iklim global, perlindungan dan konservasi lautan menjadi semakin penting dalam mengatasi dampak negatif perubahan iklim terhadap ekosistem laut. Pemanasan global, peningkatan suhu laut, dan asam laut adalah beberapa dampak perubahan iklim yang dapat mengancam kelangsungan hidup kehidupan laut. Penelitian oleh Wong dan Johnson (2021) menyoroti pentingnya

adaptasi dan mitigasi perubahan iklim dalam upaya konservasi laut yang mengatakan bahwa langkah-langkah untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan ketahanan ekosistem laut terhadap perubahan iklim diperlukan untuk melindungi keanekaragaman hayati laut yang kaya. Kemitraan antara pemerintah, lembaga non-pemerintah, masyarakat sipil, dan sektor swasta juga perlu diperkuat untuk mencapai tujuan konservasi dan perlindungan lautan. Penelitian oleh Johnson dan Martinez (2020) menyoroti pentingnya kolaborasi lintas sektor dalam mendukung upaya konservasi lautan yang menyatakan bahwa kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan merupakan kunci untuk mencapai tujuan konservasi laut yang berkelanjutan.

2.8 Penelitian dan Teknologi Oseanografi

Peran penting penelitian dan teknologi dalam memahami dinamika lautan dan mengatasi tantangan lingkungan yang dihadapi oleh lautan kita. Penelitian ilmiah di bidang oseanografi telah menghasilkan pemahaman yang mendalam tentang proses-proses fisika, kimia, biologi, dan geologi yang terjadi di lautan, serta dampaknya terhadap kehidupan di Bumi. Teknologi canggih juga telah memainkan peran kunci dalam memungkinkan pemantauan dan pemodelan yang akurat dari lingkungan laut, memberikan wawasan yang berharga untuk pengelolaan sumber daya laut dan perlindungan lingkungan.

Pertama-tama, penelitian oseanografi telah memberikan wawasan yang mendalam tentang proses fisika laut, termasuk arus laut, gelombang laut, dan sifat-sifat termal dan salinitas air laut. Melalui penggunaan teknik pemantauan seperti alat pengukur arus, stasiun pengamatan laut, dan penggunaan teknologi satelit, ilmuwan telah mampu memetakan pola arus laut global dengan tingkat resolusi yang tinggi. Studi oleh Johnson *et al.* (2020) menyoroti pentingnya pemahaman tentang dinamika arus laut dalam memprediksi pergerakan massa air laut, menyatakan bahwa penelitian tentang arus laut adalah kunci untuk memahami transportasi materi dan energi di seluruh lautan kita.

Selain itu, penelitian kimia laut telah memberikan wawasan yang penting tentang siklus biogeokimia di lautan, termasuk siklus karbon, nitrogen, dan fosfor. Melalui pengumpulan dan analisis sampel air laut dari berbagai lokasi di seluruh dunia, ilmuwan telah dapat menentukan

distribusi unsur kimia dan senyawa organik di lautan. Martinez dan Wong (2019) menyoroti peran penting kimia laut dalam memahami siklus karbon di lautan yang menyatakan bahwa penelitian tentang keseimbangan karbon laut adalah kunci untuk memahami peran lautan dalam mengatur konsentrasi karbon di atmosfer dan mitigasi perubahan iklim.

Melalui survei dan pemantauan yang berkelanjutan, ilmuwan telah dapat mengidentifikasi pola migrasi, habitat penting, dan perilaku reproduksi berbagai spesies laut. Studi oleh Garcia *et al.* (2021) menyoroti pentingnya penelitian biologi laut dalam mendukung manajemen perikanan yang berkelanjutan, menyatakan bahwa pemahaman tentang siklus hidup dan migrasi spesies ikan adalah kunci untuk mengembangkan strategi penangkapan yang berkelanjutan.

Penelitian geologi laut telah memberikan pemahaman yang mendalam tentang sejarah dan evolusi bentuk lautan, serta dampak aktivitas geologis terhadap lingkungan laut. Melalui survei seismik, pemetaan dasar laut, dan pengamatan vulkanisme bawah laut, ilmuwan telah mampu memahami proses pembentukan dan perubahan morfologi dasar laut. Penelitian oleh Thompson dan Brown (2020) menyoroti peran geologi laut dalam memahami risiko bencana geologi laut yang menyatakan bahwa penelitian tentang potensi gempa bumi, letusan gunung berapi, dan pergeseran lempeng tektonik adalah kunci untuk mitigasi risiko bencana laut.

Dalam hal teknologi, perkembangan terbaru dalam sensorika dan instrumentasi telah memungkinkan pemantauan yang lebih akurat dan canggih dari lingkungan laut. Teknologi sensor yang dipasang pada platform pengamatan laut, seperti boya dan kapal penelitian, dapat mengumpulkan data tentang suhu, salinitas, kekeruhan, dan konsentrasi nutrisi di lautan. Studi oleh Brown *et al.* (2019) menyoroti peran teknologi sensor dalam mendukung penelitian oseanografi yang menyatakan bahwa penggunaan sensor berbasis *Internet of Things (IoT)* telah mengubah cara kita memahami dan memantau dinamika laut.

Pengembangan sistem pemantauan dan pengawasan (SPP) telah memungkinkan pemantauan yang lebih luas dan berkelanjutan dari lingkungan laut. Penelitian oleh Martinez *et al.* (2021) menyoroti peran sistem pemantauan dan pengawasan dalam mendukung manajemen

perikanan yang adaptif, menyatakan bahwa integrasi data SPP dapat membantu memprediksi pergerakan dan distribusi sumber daya ikan, serta merespons secara cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Teknologi pemantauan, pemodelan oseanografi numerik juga menjadi alat penting dalam memahami dinamika lautan dan memprediksi perubahan lingkungan. Melalui penggunaan teknik matematika dan komputer, ilmuwan dapat mensimulasikan pergerakan massa air, pola aliran, dan interaksi antara komponen fisik, kimia, dan biologi di lautan. Studi oleh Johnson dan Garcia (2020) menyoroti peran pemodelan oseanografi dalam mendukung pengambilan keputusan yang berbasis bukti, menyatakan bahwa penggunaan model numerik dapat membantu mengidentifikasi pola perubahan lingkungan dan merencanakan strategi manajemen yang efektif. Penelitian oleh Wong *et al.* (2018) menyoroti peran data satelit dalam pemantauan perubahan lingkungan laut yang global yang menyatakan bahwa analisis data satelit dapat memberikan gambaran yang komprehensif tentang dinamika lautan di berbagai skala ruang dan waktu.

Selain teknologi pemantauan dan pemodelan, inovasi dalam pengolahan dan analisis data juga menjadi fokus penelitian oseanografi. Melalui pengembangan algoritma dan teknik analisis data yang canggih, ilmuwan dapat mengidentifikasi pola dan tren yang tersembunyi dalam dataset yang besar dan kompleks. Penelitian oleh Smith *et al.* (2020) menyoroti pentingnya kolaborasi lintas disiplin dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian yang rumit, menyatakan bahwa kolaborasi antar disiplin ilmu dapat menghasilkan inovasi yang signifikan dalam penelitian oseanografi.

Bab 3

GEOGRAFI DAN TOPOGRAFI LAUTAN

Bab ini akan membahas mengenai geografi dan topografi lautan, dua aspek krusial yang membentuk ekosistem maritim. Lautan, yang meliputi lebih dari 70% permukaan bumi, merupakan salah satu komponen terpenting dalam menjaga keseimbangan ekosistem global. Memahami distribusi dan karakteristik dasar laut tidak hanya penting bagi ilmu pengetahuan alam, tetapi juga bagi keberlanjutan hidup manusia, baik dari segi ekonomi, lingkungan, maupun sosial.

Jika membahas mengenai geografi dan topografi lautan di dunia, maka kita tidak akan terlepas membahas lima lautan besar yang saling terhubung dan sebenarnya merupakan satu badan air raksasa, yang biasa disebut samudra. Lima samudra dari yang terkecil hingga terbesar adalah: Arktik, Selatan, Hindia, Atlantik, dan Pasifik (**Gambar 3.1**). Jika ditambahkan laut-laut kecil seperti Barents, Beaufort, Chukchi, Kara, Laptev, Siberia Timur, Lincoln, Wandel, Greenland, dan Norwegia, total luas samudra akan mencapai sekitar 361.000.000 km² (sekitar 71% dari permukaan bumi), dengan volume total sekitar 1.370.000.000 km³, dan kedalaman rata-rata 3.790 m (<https://www.marinebio.org/oceans/geography/>). Hidrosfer kita (samudra ditambah semua air tawar di air tanah, danau, sungai, salju, es, dan atmosfer) membentuk sekitar 0,023% dari total massa bumi.



Gambar 3.1. Distribusi samudera di dunia

(Sumber: [https://www.bluegrowth.org/Oceans Rivers Seas/Index Oceans Seas Bays Gulfs Of The World %20A To Z Lists.htm](https://www.bluegrowth.org/Oceans%20Rivers%20Seas/Index%20Oceans%20Seas%20Bays%20Gulfs%20Of%20The%20World%20A%20To%20Z%20Lists.htm))

Material terrigenous, pelagis, dan authigenic menyusun sebagian besar sedimen laut. Erosi, pelapukan, dan aktivitas vulkanik di daratan mengalir ke laut dan menciptakan pasir, lumpur, dan partikel batuan yang membentuk deposit terrigenous. Akibatnya, deposit terrigenous terbatas pada jalur-jalur sempit di dekat daratan seperti landas kontinen dan paling dalam di dekat muara sungai besar atau pantai gurun. Deposit pelagis yang berasal dari air laut adalah tanah liat merah dan sisa-sisa kerangka organisme yang mati dan tenggelam ke dasar laut. Hal ini termasuk tanah liat merah pelagis dan globigerina, pteropod dan lumpur silika. Sebagian besar dasar laut sebenarnya ditutupi oleh sisa-sisa organik ini dengan kedalaman yang berkisar antara 60 hingga 3.300 m, tetapi paling tebal di zona konvergensi dan upwelling. Deposit authigenic terdiri dari partikel-partikel seperti nodul mangan dan termasuk montmorillonit dan phillipsite dan dapat ditemukan di tempat-tempat di mana proses sedimentasi berlangsung sangat lambat atau arus menyusun endapan.

Berikut ini adalah pembahasan lebih lanjut mengenai karakter geografi dan topografi dari lima samudra di dunia yang telah disebutkan sebelumnya.

(<https://www.marinebio.org/oceans/geography/>):

a. Samudra Arktik

Samudra Arktik adalah yang terkecil dari semua samudra di dunia, dengan pusatnya berada di sekitar Kutub Utara (**Gambar 3.2.**). Samudra Arktik dan laut-laut marginalnya—Chukchi, Siberia Timur, Laptev, Kara, Barents, Putih, Greenland, dan Beaufort, serta menurut beberapa ahli oseanografi, juga Laut Bering dan Norwegia—merupakan cekungan dan badan air yang paling kurang dikenal di dunia. Hal ini disebabkan oleh letaknya yang terpencil, cuaca yang keras, dan lapisan es yang selalu ada sepanjang tahun atau musiman. Namun, hal ini mulai berubah karena Arktik mungkin menunjukkan respons yang kuat terhadap perubahan global dan berpotensi memulai perubahan iklim dramatis melalui perubahan yang diinduksi dalam sirkulasi termohalin laut oleh arus dingin yang bergerak ke selatan atau melalui efeknya pada albedo global yang dihasilkan dari perubahan dalam total lapisan esnya.



Gambar 3.2. Samudera Arktik

(Sumber: https://www.worldrover.com/vital/arctic_ocean.html)

Meskipun Samudra Arktik adalah yang terkecil di antara samudra di Bumi, dengan luas hanya sedikit lebih dari seperenam luas Samudra Hindia yang merupakan samudra terbesar berikutnya, luasnya yang mencapai 5.440.000 mil persegi (14.090.000-kilometer persegi) adalah lima kali lebih besar daripada laut terbesar, yaitu Laut Mediterania. Kedalaman terdalam yang pernah diukur di perairan Arktik adalah 18.050 kaki (5.502 meter), tetapi kedalaman rata-ratanya hanya 3.240 kaki (987 meter).

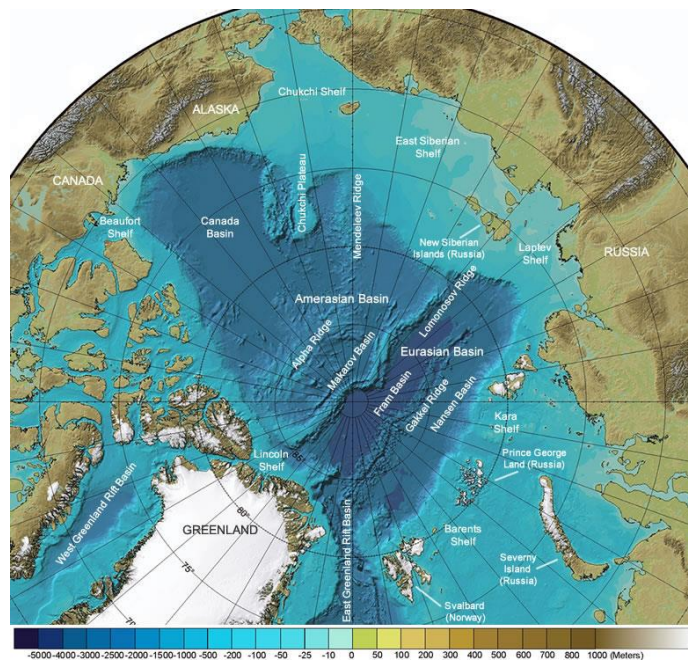
Samudra Arktik dipisahkan oleh punggung bawah laut yang dikenal sebagai Punggungan Lomonosov menjadi dua cekungan utama: Cekungan Eurasia atau Nasin, dengan kedalaman antara 4.000 hingga 4.500 meter, dan Cekungan Amerika Utara atau Hyperborean, dengan kedalaman sekitar 4.000 meter. Topografi dasar Samudra Arktik menunjukkan variasi yang signifikan, terdiri dari punggung blok sesar (fault-blok), dataran abyssal, serta berbagai kedalaman dan cekungan laut, dengan kedalaman rata-rata 1.038-meter akibat pengaruh landas kontinen di sisi Eurasia (**Gambar 3.3.**).

Aliran air utama yang memasuki Samudra Arktik berasal dari Samudra Atlantik melalui Arus Norwegia, yang kemudian mengalir di sepanjang pantai Eurasia. Meskipun demikian, air juga memasuki Samudra Arktik dari Samudra Pasifik melalui Selat Bering. Aliran keluar terbesar berasal dari Arus Greenland Timur. Sebelumnya, es menutupi sebagian besar Samudra Arktik sepanjang tahun, namun kondisi ini telah berubah drastis akibat pemanasan global. Ketika es mencair di Samudra Arktik, salinitas dan suhu sub-beku di perairan tersebut menjadi tidak stabil. Proses pencairan es menyebabkan variasi signifikan dalam tingkat salinitas karena pencampuran air tawar dari es yang mencair dengan air laut asin. Selain itu, suhu sub-beku yang dihasilkan es yang mencair ini berkontribusi dalam mendinginkan udara yang bergerak menuju khatulistiwa. Udara dingin ini kemudian bercampur dengan udara hangat di lintang tengah, yang menyebabkan presipitasi berupa hujan dan salju. Fenomena ini penting dalam pola iklim global karena mempengaruhi sirkulasi udara dan pola cuaca di berbagai belahan dunia.

Kehidupan laut di perairan dingin Samudra Arktik umumnya jarang ditemukan, terutama karena kondisi lingkungan yang ekstrem dan keterbatasan sumber makanan. Namun, di perairan terbuka

bagian selatan, terdapat kehidupan laut yang lebih melimpah karena perairan tersebut lebih hangat dan lebih kaya nutrisi. Jalur udara yang melintasi wilayah Arktik sering digunakan karena menawarkan rute terpendek antara pantai Pasifik Amerika Utara dan Eropa. Hal ini mengurangi waktu tempuh dan biaya operasional untuk penerbangan komersial dan kargo. Selain itu, penggunaan jalur udara ini juga mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon, sehingga lebih efisien dari segi ekonomi dan lingkungan.

Untuk pelayaran, pelabuhan utama di wilayah ini adalah kota-kota Rusia seperti Murmansk dan Arkhangelsk. Pelabuhan-pelabuhan ini memainkan peran penting dalam perdagangan maritim dan eksplorasi sumber daya alam di kawasan Arktik. Murmansk, misalnya, merupakan pelabuhan bebas es terbesar di Arktik dan berfungsi sebagai pusat logistik utama untuk ekspedisi ilmiah dan eksplorasi energi di wilayah tersebut. Arkhangelsk, di sisi lain, memiliki sejarah panjang sebagai pusat perdagangan maritim dan terus berfungsi sebagai pintu gerbang penting untuk akses ke Samudra Arktik.



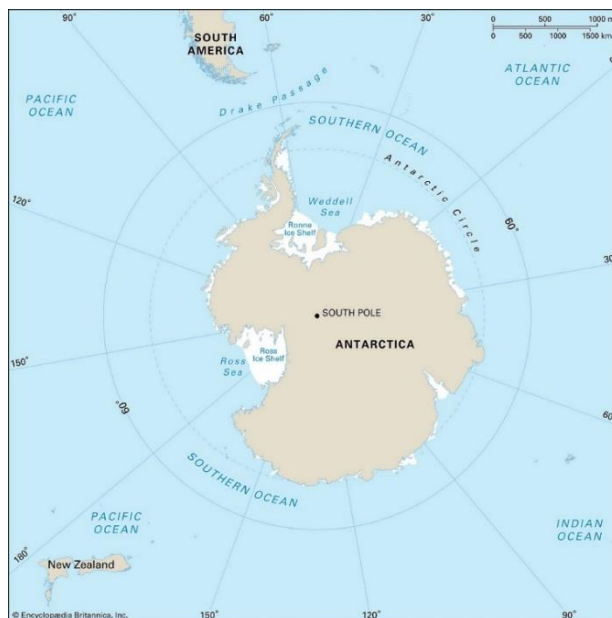
Gambar 3.3. Dasar Samudra Arktik

(Sumber: <https://geology.com/articles/arctic-ocean-features/>)

b. Samudra Selatan

Samudra Selatan adalah badan air terbesar keempat di dunia. Samudra ini mengelilingi Antartika dan sebenarnya terbagi di antara Samudra Atlantik, Hindia, dan Pasifik (**Gambar 3.4.**). Kebanyakan orang di Amerika Utara dan Eropa Kontinental tidak memiliki nama untuk area ini dan menganggapnya sebagai bagian dari Samudra Atlantik, Pasifik, dan Hindia yang hanya meluas ke Antartika. Namun, karena pelaut telah lama menyebut daerah ini sebagai "Samudra Selatan", maka diterima sebagai samudra pada tahun 2000 oleh Organisasi Hidrografi Internasional.

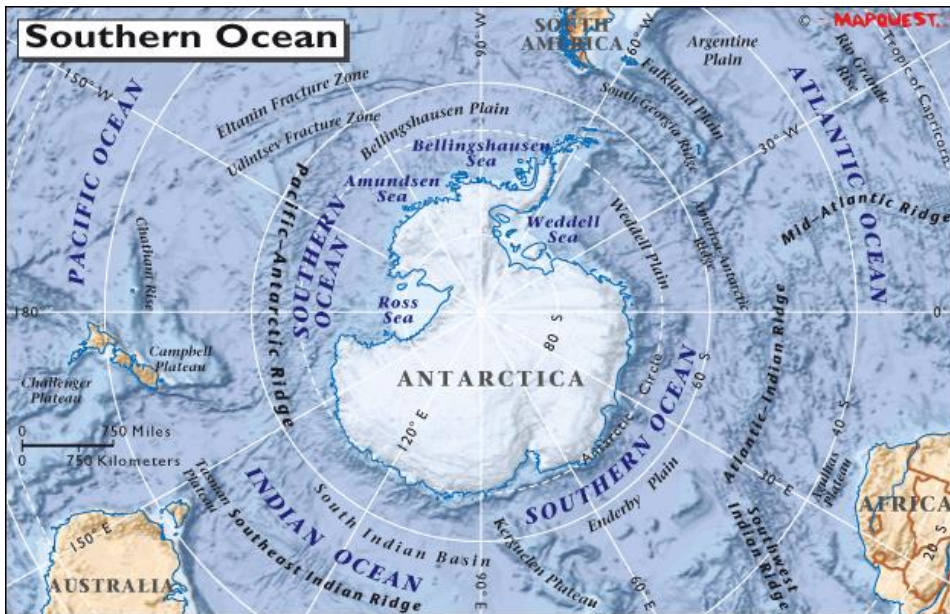
Samudra Selatan adalah badan air asin yang mencakup sekitar seperenam dari total area samudra di Bumi. Samudra Selatan terdiri dari bagian-bagian samudra dunia di selatan Samudra Pasifik, Atlantik, dan Hindia serta laut-laut yang mengelilingi Antartika di bawah 60° S. Samudra ini tidak terputus oleh daratan benua lain. Penyempitan tersempitnya adalah Selat Drake, yang lebarnya 600 mil (sekitar 1.000 km), antara Amerika Selatan dan ujung Semenanjung Antartika. Dalam hal luas, hanya Samudra Arktik yang lebih kecil dari Samudra Selatan.



Gambar 3.4. Samudra Selatan

(Sumber: <https://www.britannica.com/place/Southern-Ocean>)

Samudra Selatan sebagian besar merupakan perairan dalam, dengan kedalaman rata-rata 4.000-5.000 m, dan termasuk landas kontinen Antartika, area yang sangat dalam dan sempit dengan tepi kedalaman 400-800 m (lebih dari 270-670 m lebih dalam dari rata-rata) (**Gambar 3.5.**). Titik terendah adalah 7.235 m di ujung selatan Palung Sandwich Selatan. Ada peningkatan tujuh kali lipat dalam ukuran lapisan es Antartika antara Maret dan September (meskipun ini juga berubah karena pemanasan global), berkisar dari 2.600.000 km² hingga 18.800.000 km². Arus laut terbesar di dunia, Arus Sirkumpolar Antartika (21.000 km panjangnya) bergerak terus-menerus ke timur area ini dan mengangkut 130.000.000 m³ air per detik—100 kali lipat dari aliran semua sungai di dunia saat digabungkan.



Gambar 3.5. Dasar Samudra Selatan

(Sumber: <https://ankuri.hiho.jp/yama/norm.htm/southocean.htm>)

c. Samudra Hindia

Samudra Hindia menempati urutan ketiga samudra terbesar di dunia dan mencakup sekitar 20% dari total permukaan air di bumi. (**Gambar 3.6.**). Samudra ini dibatasi oleh Asia selatan di utara,

Semenanjung Arab dan Afrika di barat, Semenanjung Malaya, Kepulauan Sunda dan Australia di timur, dan Samudra Selatan di selatan. Meridian 20° timur memisahkan Samudra Hindia dari Samudra Atlantik dan meridian 147° timur memisahkannya dari Samudra Pasifik. Samudra Hindia membentang hingga sekitar 30° Lintang Utara di Teluk Persia pada batas paling utara. Di ujung selatan Afrika dan Australia, lebarnya hampir 10.000 km (atau 6.200 mil) dan luasnya 73.556.000 km² (atau 28.400.000 mil²) ketika Laut Merah dan Teluk Persia termasuk di dalamnya. Volume badan air besar ini diperkirakan mencapai 292.131.000 km³ (atau 70.086.000 mil³). Fitur lainnya termasuk pulau-pulau kecil di sekitar tepi benua seperti Madagaskar (pulau terbesar keempat di dunia), Komoro, Seychelles, Maladewa, Mauritius, Sri Lanka, dan Indonesia. Samudra Hindia adalah rute transit penting antara Asia dan Afrika, fitur geografis yang telah memicu beberapa konflik sejarah yang kuat. Karena Samudra Hindia sangat luas, tidak ada negara yang menguasainya hingga awal 1800-an ketika Inggris mampu mendominasi sebagian besar daratan di sekitarnya.



Gambar 3.6. Samudra Hindia

(Sumber: <https://www.whatarethe7continents.com/indian-ocean/>)

Di bawah permukaan Samudra Hindia terdapat konvergensi lempeng kerak Afrika, India, dan Antartika—pertemuannya ditandai oleh cabang berbentuk Y dari Punggungan Tengah-Samudra dan

batang yang berjalan ke selatan dari tepi landas kontinen dekat Mumbai, India. Punggungan yang dihasilkan membagi cekungan timur, barat, dan selatan menjadi cekungan yang lebih kecil. Samudra Hindia terdiri dari landas kontinen sempit selebar 200 km (125 mil) kecuali landas dengan lebar yang melebihi 1.000 km (600 mil) di lepas pantai barat Australia. Kedalaman rata-rata samudra ini adalah 3.890 m dengan titik terdalamnya berada di Palung Jawa pada 7.450 m (**Gambar 3.7.**). Di utara 50° Lintang Selatan, 86% dari cekungan utama tertutup oleh sedimen pelagis dan lebih dari setengahnya adalah ooze globigerina. Sisanya dilapisi dengan sedimen terrigenous dan hampir semua lintang selatan ekstrem tertutup oleh endapan glasial.

Beberapa sungai besar yang bermuara ke Samudra Hindia meliputi Zambezi, Arvandrud/Shatt-al-Arab, Indus, Gangga, Brahmaputra, dan Irrawaddy. Pola arus di wilayah oseanografis ini sangat dipengaruhi oleh monsun. Di belahan bumi utara, arus bergerak searah jarum jam, sementara di selatan khatulistiwa, arus bergerak berlawanan arah jarum jam. Kedua pola arus utama ini membentuk sebagian besar sistem sirkulasi di wilayah tersebut. Selama monsun musim dingin, arah arus di belahan bumi utara berbalik.

Aliran air dalam di Samudra Hindia sebagian besar diatur oleh pergerakan air yang berasal dari Samudra Atlantik, Laut Merah, dan arus dari Antartika. Dinamika ini menciptakan pola sirkulasi yang kompleks dan penting untuk keseimbangan termohalin global. Air dari Samudra Atlantik yang mengalir melalui Laut Merah membawa sifat-sifat salinitas yang tinggi, sementara arus dari Antartika membawa air yang lebih dingin dan kaya oksigen. Kombinasi ini menciptakan gradien suhu dan salinitas yang unik di Samudra Hindia.

Suhu permukaan di utara 20° Lintang Selatan berkisar sekitar 22°C (72°F), tetapi suhu ini meningkat hingga melebihi 28°C (82°F) di bagian timur samudra. Peningkatan suhu ini disebabkan oleh pengaruh arus hangat dari Pasifik melalui Indonesia, serta radiasi matahari yang kuat di kawasan tropis. Sebaliknya, suhu permukaan menurun drastis di selatan 40° Lintang Selatan karena pengaruh arus

dingin dari Antartika dan lebih sedikit radiasi matahari yang diterima di lintang tinggi tersebut.

Salinitas tertinggi terjadi di Laut Arab dan di sabuk antara Afrika selatan dan Australia barat daya. Salinitas rata-rata air permukaan di kawasan ini berkisar antara 32 hingga 37 bagian per seribu (ppt). Faktor-faktor seperti penguapan tinggi, curah hujan rendah, dan input air dari sungai besar seperti Gangga dan Indus mempengaruhi variasi salinitas di Samudra Hindia.

Sepanjang tahun, lapisan es dan gunung es dapat ditemukan di wilayah selatan 65° Lintang Selatan. Kehadiran es laut ini dipengaruhi oleh suhu rendah dan arus dingin dari Antartika. Meskipun begitu, lapisan es umumnya tidak mencapai batas utara di 45° Lintang Selatan karena pengaruh arus hangat yang bergerak ke selatan dan suhu yang lebih tinggi di lintang tersebut. Perubahan iklim global juga berperan dalam variasi tahunan dan musiman distribusi es di Samudra Hindia.



Gambar 3.7. Dasar Samudra Hindia

(Sumber: <https://www.mapsales.com/national-geographic/world-wall-maps/indian-ocean-floor-wall-map.aspx>)

d. Samudra Atlantik

Samudra terbesar kedua di dunia adalah Samudra Atlantik, nama yang berasal dari "Laut Atlas" dalam mitologi Yunani. Samudra ini mencakup sekitar seperlima dari seluruh samudra global. Air mengalir ke Samudra Atlantik dari wilayah daratan yang luasnya empat kali lebih besar daripada Samudra Pasifik dan Hindia. Luas Samudra Atlantik tanpa termasuk laut-laut di sekitarnya adalah 82.400.000 km² dengan volume 323.617.637 km³. Jika laut-laut di sekitarnya disertakan, luasnya menjadi 106.400.000 km² dengan volume 354.700.000 km³. Dengan memasukkan laut-laut tersebut, kedalaman rata-rata Samudra Atlantik adalah 3.332 m (10.932 kaki). Tanpa laut-laut di sekitarnya, kedalaman rata-rata Atlantik adalah 3.926 m (12.881 kaki). Titik terdalam berada di Palung Puerto Rico dengan kedalaman 8.605 m (28.232 kaki). Lebar Samudra Atlantik bervariasi, dari 2.848 km antara Brasil dan Liberia hingga 4.830 km antara Amerika Serikat dan Afrika Utara.

Geografi samudra ini dapat divisualisasikan sebagai cekungan berbentuk S besar yang membentang dari utara ke selatan dan terbagi menjadi Atlantik Utara dan Atlantik Selatan oleh arus balik di ekuator (sekitar 8° Lintang Utara). Di barat, Atlantik membentang hingga Amerika Utara dan Selatan. Di timur, Atlantik terhubung ke Samudra Pasifik oleh Samudra Arktik di utara dan selatan (**Gambar 3.8.**). Tenaga manusia yang luar biasa menciptakan Terusan Panama, yang sekarang menghubungkan Samudra Atlantik dan Pasifik. Meridian 20° timur membagi Atlantik dari Samudra Hindia di timur. Samudra Arktik dipisahkan dari Atlantik oleh garis dari Greenland ke Svalbard paling selatan ke Norwegia utara. Titik terendah Atlantik adalah 4.665 m di Cekungan Fram.



Gambar 3.8. Samudra Atlantik

(Sumber; https://www.worldrover.com/vital/atlantic_ocean.html)

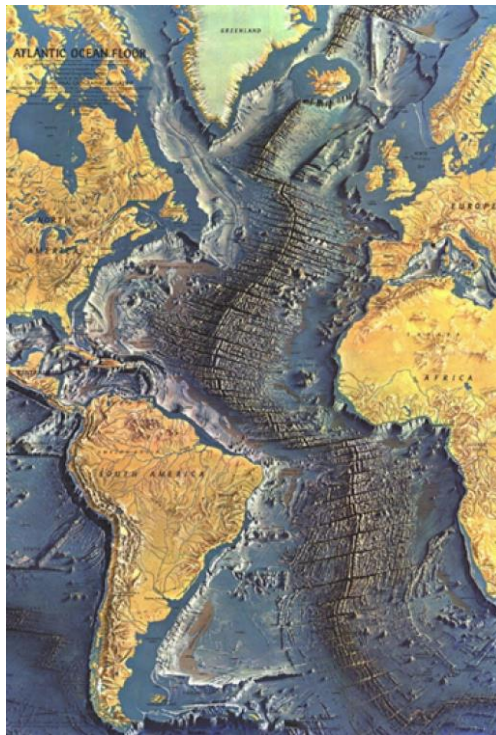
Pesisir Samudra Atlantik dicirikan oleh berbagai teluk besar dan laut, seperti Laut Karibia, Teluk Meksiko, Teluk St. Lawrence, Laut Mediterania, Laut Hitam, Laut Utara, Laut Baltik, dan Laut Norwegia-Greenland. Beberapa pulau utama di kawasan ini termasuk Svalbard, Greenland, Islandia, Rockall, Inggris Raya, Irlandia, Fernando de Noronha, Azores, Kepulauan Madeira, Kepulauan Canary, Kepulauan Cape Verde, Newfoundland, Bermuda, Hindia Barat, Ascension, St. Helena, Tristan da Cunha, Kepulauan Falkland, dan Pulau Georgia Selatan.

Punggungan gunung bawah laut yang besar yang disebut Punggungan Tengah-Atlantik membentang dari Islandia di utara hingga sekitar 58° Lintang Selatan, menjadi sangat lebar sekitar 1.600 km. Lembah rift, atau lembah yang terbentuk oleh patahan, membentang di sepanjang sebagian besar panjang Punggungan Tengah-Atlantik dan kedalaman punggungan ini kurang dari 2.700 m di banyak tempat dengan puncak gunung yang naik membentuk pulau-pulau di atas air. Punggungan bawah laut yang lebih kecil di Atlantik selatan dikenal sebagai Punggungan Walvis.

Atlantik terbagi oleh Punggungan Tengah-Atlantik menjadi dua cekungan besar yang dalamnya antara 3.700 hingga 5.500 m.

Punggungan melintang yang melintasi antara benua dan Punggungan Tengah-Atlantik membagi dasar samudra menjadi banyak cekungan yang berbeda. Cekungan besar di Atlantik Utara termasuk Cekungan Guiana, Amerika Utara, Cape Verde, dan Canaries. Di Atlantik Selatan cekungan besar termasuk Cekungan Angola, Cape, Argentina, dan Brasil.

Dasar laut yang dalam sebagian besar datar tetapi ada cukup banyak gunung laut, guyot, dan kedalaman atau palung (**Gambar 3.9.**). Palung terdalam di Atlantik Utara adalah Palung Puerto Rico pada 8.605 m, di Atlantik Selatan adalah Palung South Sandwich pada 8.428 m dan di dekat ekuator adalah Palung Romanche pada 7.454 m. Titik terdalam di Atlantik adalah 8.605 m dan disebut Milwaukee Deep, area yang terletak di Palung Puerto Rico. Di lepas pantai timur Kanada terdapat Abyss Laurentian. Landas yang berjalan di sepanjang tepi benua membentuk sekitar 11% dari topografi dasar selain beberapa saluran dalam yang memotong kenaikan kontinen.



Gambar 3.9. Dasar Samudra Atlantik

(Sumber: <https://geographicbook.com/bottom-topography-the-atlantic-ocean/>)

e. Samudra Pasifik

Samudra Pasifik adalah badan air terbesar di dunia dan dinamai oleh penjelajah Portugis Ferdinand Magellan. Magellan menemukan bahwa sebagian besar perjalanannya dari Selat Magellan ke Filipina melewati perairan yang sangat tenang, sehingga ia menyebutnya "Pasifik," yang berarti tenang dalam bahasa Prancis. Bertolak belakang dengan namanya, pulau-pulau di "samudra yang tenang" ini sering dihantam oleh topan dan badai. Negara-negara yang terletak di sekitar Samudra Pasifik, yang dikenal sebagai Lingkaran Pasifik, sering mengalami aktivitas vulkanik dan gempa bumi. Banyak area telah musnah oleh Tsunami, gelombang besar yang disebabkan oleh gempa bawah laut.

Samudra Pasifik menutupi sepertiga permukaan bumi dengan luas sekitar 179,7 juta km², membentang sejauh 15.500 km dari Laut Bering di Arktik hingga perairan dingin Laut Ross di Antartika. Bagian terlebar dari Samudra Pasifik berada di arah timur pada 5° Lintang Utara, yang membentang dari Indonesia hingga Pantai Kolombia, mencapai jarak 19.800 km (**Gambar 3.10.**). Titik terjauh ke barat kemungkinan besar adalah Selat Malaka. Samudra Pasifik juga memiliki titik terdalam di bumi, yaitu Palung Mariana, yang terletak 10.911 meter di bawah permukaan laut. Ada 25.000 pulau Pasifik di Samudra Pasifik—lebih banyak dari samudra lainnya.

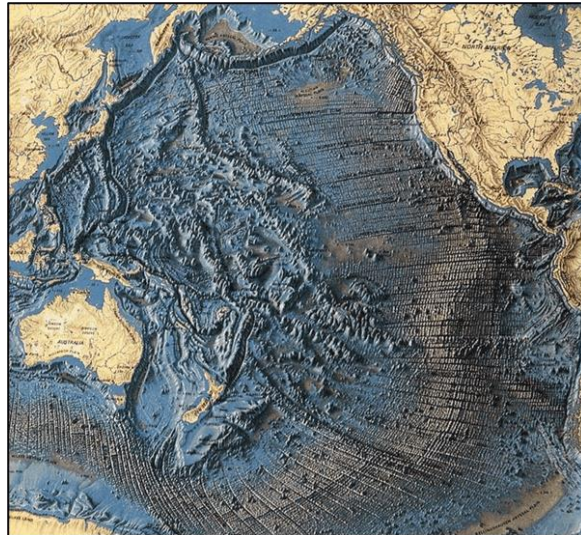


Gambar 3.10. Samudra Pasifik

(Sumber: <https://science4fun.info/pacific-ocean/>)

Sebagian besar pulau-pulau ini terletak di selatan khatulistiwa. Laut terbesar di Pasifik termasuk: Laut Sulawesi, Laut Karang, Laut Cina Timur, Laut Jepang, Laut Cina Selatan, Laut Sulu, Laut Tasman, dan Laut Kuning. Samudra Pasifik dan Hindia terhubung oleh Selat Malaka di barat sedangkan Samudra Pasifik dan Atlantik terhubung oleh Selat Magellan di timur.

Sebagian besar dasar laut di cekungan Pasifik tengah cukup rata dan memiliki kedalaman rata-rata 4.270 m. Sebagian besar variasi di dasar laut terdiri dari puncak bawah laut yang curam dan bertopi datar yang disebut gunung laut (**Gambar 3.11.**). Busur gunung, yang dikenal sebagai Kepulauan Solomon dan Selandia Baru, menjulang di atas permukaan di barat. Busur gunung juga membentuk palung dalam seperti Palung Mariana, Palung Filipina, dan Palung Tonga di tepi luar landas kontinen Pasifik barat yang luas. Peninggian Pasifik Timur adalah sekitar 3.000 km lebar dan naik sekitar 3 km di atas dasar laut yang berdekatan. Peninggian ini terletak di sepanjang tepi timur cekungan Pasifik, komponen dari punggung tengah-samudra di seluruh dunia. Sebagian besar sedimen di Samudra Pasifik bersifat authigenic atau pelagis karena area daratan yang relatif kecil yang mengalir ke badan air yang besar ini.



Gambar 3.11. Dasar Samudra Pasifik

(Sumber: <https://geographicbook.com/bottom-topography-of-pacific-ocean/>)

Bab 4

KEANEKARAGAMAN BIOLOGI LAUT

4.1 Ekosistem Laut

Ekosistem laut merupakan kumpulan sistem yang kompleks dan dinamis, yang melibatkan interaksi antara beragam komponen biotik dan abiotik di lingkungan laut. Komponen biotiknya mencakup berbagai bentuk kehidupan, mulai dari organisme mikroskopis hingga mamalia besar seperti paus dan lumba-lumba, serta berbagai jenis flora dan fauna laut lainnya. Di sisi lain, komponen abiotiknya mencakup faktor-faktor fisik dan kimia seperti suhu air, salinitas, keasaman (pH), dan cahaya matahari, yang memainkan peran penting dalam menentukan pola distribusi dan kelangsungan hidup organisme laut. Keberagaman habitat laut, mulai dari terumbu karang yang berwarna-warni hingga lautan dalam yang gelap, mendukung kehidupan beragam spesies dengan adaptasi yang unik terhadap lingkungannya. Interaksi kompleks antara organisme dan lingkungan mereka membentuk jaring-jaring makanan yang kompleks dan siklus nutrisi yang memengaruhi stabilitas dan dinamika ekosistem laut. Pentingnya ekosistem laut tidak hanya terletak pada keberagaman hayati yang tinggi, tetapi juga pada peran pentingnya dalam menyediakan berbagai layanan ekosistem bagi manusia. Ini termasuk sebagai sumber makanan bagi jutaan orang, penyedia air bersih dan udara bersih, sumber obat-obatan alami, dan sebagai pengatur iklim global melalui proses-proses seperti penyerapan karbon (Halpern *et al.*, 2008).

Keanekaragaman hayati di laut dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat alami maupun yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Faktor lingkungan abiotik, seperti suhu, salinitas, cahaya, dan kedalaman laut, memiliki peran krusial dalam menentukan distribusi, keberagaman,

dan aktivitas organisme di ekosistem laut. Suhu air laut, misalnya, menjadi faktor penting karena mempengaruhi tingkat metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi organisme laut. Organisme cenderung memiliki preferensi terhadap rentang suhu tertentu di mana mereka dapat berkembang biak dan bertahan hidup. Salinitas atau konsentrasi garam di perairan laut juga memainkan peran penting dalam menentukan komposisi dan keanekaragaman spesies di ekosistem laut. Organisme laut memiliki toleransi yang berbeda terhadap perubahan salinitas, dengan beberapa spesies lebih adaptif terhadap fluktuasi salinitas daripada yang lain.

Ketersediaan cahaya matahari juga merupakan faktor yang mempengaruhi ekosistem laut, terutama dalam mendukung kegiatan fotosintesis tumbuhan laut. Cahaya matahari diperlukan untuk proses fotosintesis, yang menjadi dasar bagi banyak rantai makanan di ekosistem laut. Oleh karena itu, distribusi tumbuhan laut dan organisme yang bergantung pada fotosintesis sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya di perairan. Terakhir, kedalaman laut memainkan peran penting dalam menentukan tekanan hidrostatik, suhu, dan ketersediaan cahaya di lingkungan laut. Perubahan-perubahan ini berdampak langsung pada jenis organisme yang dapat hidup di suatu wilayah, dengan organisme yang hidup di kedalaman yang berbeda sering memiliki adaptasi fisik dan fisiologis yang sesuai dengan kondisi lingkungan di tingkat kedalaman tersebut (Pörtner, 2010; Somero, 2010; Falkowski & Raven, 2007).

Ketersediaan nutrisi, seperti nitrogen, fosfor, dan zat hara lainnya, memainkan peran penting dalam mengatur produktivitas primer di ekosistem laut. Nutrien-nutrien ini adalah unsur kimia yang esensial bagi pertumbuhan dan perkembangan organisme laut, terutama tumbuhan laut yang melakukan fotosintesis sebagai dasar rantai makanan di laut. Ketersediaan nutrisi secara langsung mempengaruhi kemampuan tumbuhan laut untuk melakukan fotosintesis dan memproduksi biomassa. Nitrogen dan fosfor, misalnya, adalah nutrisi utama yang dibutuhkan oleh tumbuhan laut untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan. Ketersediaan nitrogen dan fosfor yang cukup di perairan laut akan meningkatkan produktivitas tumbuhan laut, yang pada gilirannya akan mendukung pertumbuhan populasi organisme konsumen yang bergantung padanya. Selain itu, zat hara lainnya seperti

besi, magnesium, dan kalium juga berperan penting dalam mempengaruhi produktivitas ekosistem laut. Produktivitas primer yang tinggi di ekosistem laut, yang dihasilkan dari ketersediaan nutrisi yang memadai, mendukung beragam kehidupan laut dengan menyediakan sumber makanan yang cukup bagi organisme konsumen. Hal ini pada akhirnya akan memengaruhi keanekaragaman hayati dan struktur ekosistem laut secara keseluruhan (Karl, 2014).

Kondisi oseanografi, seperti arus laut, pola angin, dan sirkulasi laut, memiliki dampak yang signifikan terhadap dinamika ekosistem laut. Arus laut, misalnya, dapat membawa larva organisme laut dari satu tempat ke tempat lain, memengaruhi pola migrasi ikan dan distribusi spesies di berbagai wilayah laut. Pola angin juga berperan penting dalam menentukan arah dan kecepatan aliran air laut, yang dapat mempengaruhi pola pergerakan plankton dan distribusi nutrisi di laut. Sirkulasi laut, termasuk pola arus global dan aliran termal, juga memainkan peran penting dalam mengatur suhu laut, distribusi nutrisi, dan pola pergerakan organisme laut. Interaksi kompleks antara arus laut, pola angin, dan sirkulasi laut menciptakan kondisi lingkungan yang beragam di berbagai wilayah laut, memengaruhi keanekaragaman hayati dan produktivitas ekosistem laut. Fenomena oseanografi seperti perubahan iklim, El Niño, dan La Niña juga memiliki dampak yang signifikan terhadap kondisi lingkungan laut. Perubahan suhu permukaan laut dan pola sirkulasi yang terkait dengan fenomena iklim ini dapat mengubah distribusi spesies, memicu perubahan dalam rantai makanan, dan memengaruhi produktivitas ekosistem laut secara keseluruhan (Marshall *et al.*, 2008).

Kepadatan penduduk merupakan faktor penting yang memengaruhi keberlanjutan ekosistem laut. Semakin tinggi kepadatan penduduk di wilayah pesisir, semakin besar tekanan yang diberikan pada ekosistem laut karena aktivitas manusia seperti perikanan, pariwisata, dan polusi. Aktivitas perikanan yang berlebihan dapat menyebabkan penangkapan ikan berlebihan atau overfishing, yang mengancam keberlangsungan populasi ikan dan menyebabkan penurunan drastis dalam keanekaragaman hayati laut. Pariwisata juga dapat memberikan tekanan yang signifikan terhadap ekosistem laut, terutama jika tidak dikelola dengan baik, misalnya dengan merusak terumbu karang atau

mengganggu habitat mamalia laut. Pertumbuhan penduduk yang cepat juga meningkatkan risiko polusi laut, termasuk pencemaran oleh limbah domestik, industri, dan pertanian. Pencemaran ini dapat mengancam kesehatan organisme laut dan mengganggu rantai makanan di ekosistem. Degradasi habitat akibat aktivitas manusia seperti reklamasi pantai, pembebasan lahan, dan pembangunan infrastruktur pesisir juga menjadi ancaman serius bagi keberlanjutan ekosistem laut. Hilangnya habitat penting seperti terumbu karang dan padang lamun dapat mengakibatkan hilangnya habitat dan keanekaragaman hayati laut yang penting. Pengelolaan yang bijaksana dan kebijakan perlindungan yang efektif diperlukan untuk mengatasi dampak negatif dari kepadatan penduduk terhadap ekosistem laut. Ini termasuk pembatasan penangkapan ikan, pengelolaan pariwisata yang berkelanjutan, pengendalian polusi, dan konservasi habitat laut yang efektif (Halpernet *al.*, 2008).

Perubahan iklim merupakan salah satu faktor penting yang dapat berdampak signifikan terhadap ekosistem laut. Kenaikan suhu laut, yang merupakan salah satu konsekuensi dari perubahan iklim global, telah menyebabkan perubahan dalam distribusi spesies laut, baik itu ikan, krustasea, maupun organisme lainnya. Selain itu, peningkatan suhu laut juga dapat memengaruhi musim pemijahan dan migrasi spesies laut, yang pada gilirannya dapat mengubah dinamika populasi dan struktur ekosistem laut. Perubahan iklim juga menyebabkan peningkatan keasaman laut, yang disebabkan oleh peningkatan kadar karbon dioksida (CO₂) dalam atmosfer yang kemudian larut ke dalam air laut. Keasaman laut yang meningkat dapat berdampak negatif pada organisme laut yang memiliki kerangka kalsium karbonat, seperti karang dan moluska, karena dapat mengganggu pembentukan kerangka mereka. Perubahan iklim juga dapat mempengaruhi pola curah hujan dan siklus air laut, yang dapat memengaruhi produktivitas primer laut dan ketersediaan makanan bagi organisme laut. Hal ini dapat berdampak langsung pada rantai makanan laut dan keseimbangan ekosistem. Pemahaman tentang dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut penting untuk merancang strategi pengelolaan yang adaptif dan responsif. Upaya untuk memitigasi perubahan iklim dan mengurangi emisi gas rumah kaca dapat membantu melindungi keanekaragaman hayati laut dan menjaga keseimbangan ekosistem (Poloczanska *et al.*, 2013).

Interaksi antar spesies dalam ekosistem laut memainkan peran penting dalam mengatur populasi dan distribusi organisme, serta memengaruhi keanekaragaman hayati laut secara keseluruhan. Persaingan antar spesies, baik itu untuk sumber daya seperti makanan, ruang hidup, atau pasangan kawin, dapat mempengaruhi dinamika populasi dan distribusi organisme dalam ekosistem laut. Persaingan ini dapat menyebabkan penurunan populasi bagi spesies yang kalah dalam persaingan tersebut, sementara spesies yang lebih unggul akan mendominasi dalam lingkungan yang sama. Selain persaingan, interaksi predator-mangsa juga memiliki dampak signifikan terhadap struktur ekosistem laut. Predator, seperti hiu, paus, atau ikan predator lainnya, mengendalikan populasi spesies mangsa mereka, sehingga mencegah populasi mangsa dari pertumbuhan yang tidak terkendali. Hal ini mempertahankan keseimbangan ekosistem dan mencegah ledakan populasi yang dapat mengganggu ekosistem laut. Hubungan simbiosis antara berbagai spesies juga memainkan peran penting dalam ekosistem laut. Simbiosis mutualisme, di mana kedua spesies saling menguntungkan satu sama lain, serta simbiosis parasitisme atau komensalisme, di mana satu spesies diuntungkan sementara yang lain tidak mendapat manfaat atau merugikan, semuanya memengaruhi dinamika populasi dan keanekaragaman hayati (Stachowicz, 2001).

Keanekaragaman hayati di laut dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang kompleks dan saling terkait. Keanekaragaman hayati laut dipengaruhi oleh sejumlah faktor lingkungan, termasuk ketersediaan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan silika yang memengaruhi produktivitas primer laut. Produktivitas ini menjadi dasar rantai makanan di ekosistem laut, memengaruhi jumlah dan jenis organisme yang dapat hidup dan berkembang biak di suatu daerah laut. Faktor iklim dan cuaca, seperti suhu air laut, curah hujan, dan pola angin, juga memiliki peran signifikan dalam menentukan keanekaragaman hayati laut. Perubahan iklim, termasuk pemanasan global, dapat mengubah distribusi spesies, musim pemijahan, dan pola migrasi organisme laut. Tingkat cahaya matahari di kedalaman laut mempengaruhi pertumbuhan dan distribusi tumbuhan laut, seperti alga dan terumbu karang. Cahaya matahari juga penting bagi proses fotosintesis, yang merupakan sumber energi bagi banyak organisme laut.

Kedalaman laut memengaruhi kondisi fisik dan kimia di lingkungan laut, seperti tekanan hidrostatik, suhu, dan ketersediaan cahaya. Ini juga memengaruhi jenis organisme yang dapat hidup di suatu daerah, dengan munculnya berbagai tipe habitat laut, mulai dari zona terang hingga zona terdalam yang gelap. Kualitas air laut dan kondisi lingkungan lainnya, seperti tingkat pencemaran, keasaman, salinitas, dan oksigen terlarut, juga memainkan peran penting dalam memengaruhi keanekaragaman hayati laut. Pencemaran dapat merusak ekosistem laut dan mengancam keberlanjutan populasi organisme laut. Selain itu, interaksi antar spesies, seperti persaingan, predasi, dan simbiosis, serta perubahan habitat seperti degradasi terumbu karang dan penurunan mangrove, juga turut memengaruhi keanekaragaman hayati laut dengan mengatur populasi organisme di lingkungan laut (Lotze *et al.*, 2006; Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010; Halpern *et al.*, 2008).

Ekosistem laut memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan global dan mendukung kehidupan di bumi. Ekosistem laut memiliki peran yang sangat penting dalam menyediakan berbagai manfaat bagi manusia. Sebagai sumber makanan, ekosistem laut menyediakan ikan, kerang, udang, dan berbagai jenis biota laut lainnya yang merupakan sumber protein penting dalam diet manusia. Selain itu, laut juga berperan dalam regulasi iklim global dengan kemampuannya menyerap dan menyimpan panas dari matahari, serta dalam siklus karbon dengan menyerap karbon dioksida dari atmosfer. Sebagian besar oksigen yang kita hirup juga berasal dari laut, terutama diproduksi oleh fitoplankton laut seperti alga melalui proses fotosintesis. Di samping itu, ekosistem laut menjadi sumber potensial untuk pengembangan obat-obatan baru, dengan berbagai senyawa kimia yang dihasilkan oleh organisme laut seperti koral dan spons digunakan dalam pengobatan kanker dan penyakit lainnya. Dari segi pariwisata dan rekreasi, ekosistem laut menarik jutaan wisatawan setiap tahun untuk berbagai aktivitas seperti menyelam, snorkeling, berlayar, dan memancing. Wisatawan yang berkunjung membawa manfaat ekonomi bagi masyarakat lokal dan negara. Tidak hanya itu, ekosistem laut juga memberikan perlindungan alami bagi pantai dari erosi dan dampak badai melalui hutan mangrove, terumbu karang, dan padang lamun. Keanekaragaman hayati yang tinggi di ekosistem laut juga penting untuk menjaga stabilitas ekosistem dan

keseimbangan lingkungan laut secara keseluruhan. Selain itu, kehidupan di sekitar laut memberikan mata pencaharian bagi jutaan orang di seluruh dunia, mulai dari nelayan tradisional hingga pekerja di industri pariwisata dan perikanan (Moberg & Folke, 1999).

4.2 Keanekaragaman Hayati Makro Laut

Fauna laut besar mencakup berbagai jenis hewan laut yang memiliki ukuran yang cukup besar dan penting dalam ekosistem laut. Kelompok mamalia laut, atau Cetacea, mencakup beragam spesies hewan laut besar yang menghuni perairan di seluruh dunia. Salah satu spesies yang terkenal adalah paus, yang meliputi paus biru, paus sperma, paus pembunuh, dan paus bungkuk (Nowak, 1999). Selain paus, kelompok ini juga mencakup lumba-lumba dan paus kecil, seperti lumba-lumba botol dan lumba-lumba tutul, serta paus beluga (Jefferson *et al.*, 2015). Di antara hewan laut besar lainnya yang termasuk dalam kelompok Cetacea adalah paus paus, termasuk paus paus biru, paus paus sperma, dan paus paus pembunuh. Memiliki peran penting dalam ekosistem laut dan menjadi objek penelitian yang luas dalam bidang biologi kelautan (Reeves *et al.*, 2002).

Selain mamalia laut, ada pula hewan-hewan besar lainnya seperti kepiting raksasa dan ikan tuna yang juga merupakan bagian penting dari ekosistem laut. Kepiting raksasa, seperti kepiting raksasa Jepang dan kepiting raksasa Kodiak, memiliki peran sebagai predator utama di dasar laut (Smith *et al.*, 2015). Sementara itu, ikan tuna, seperti tuna sirip biru dan tuna sirip kuning, memiliki peran penting dalam rantai makanan laut dan merupakan target utama dalam industri perikanan (Collette *et al.*, 2011). Kelompok cetacea dan hewan-hewan laut besar lainnya memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut dan memiliki dampak signifikan pada keberlangsungan kehidupan laut dan manusia.

Flora laut mencakup berbagai jenis tumbuhan laut dan ganggang yang mendiami perairan laut di seluruh dunia. Fitoplankton, termasuk diatom, dinoflagellata, dan cyanobacteria, adalah mikroorganisme fotosintetik yang memainkan peran penting dalam ekosistem laut sebagai produsen utama dalam rantai makanan dan penyedia sebagian besar

oksigen di Bumi (Falkowski *et al.*, 2008). Alga hijau, alga merah, dan alga coklat merupakan kelompok alga laut yang memiliki peran penting dalam ekologi laut. Alga hijau, seperti *Ulva* dan *Caulerpa*, berperan sebagai sumber makanan bagi hewan laut dan dapat ditemukan di perairan pantai (Lüning, 1990). Alga merah, seperti *Gracilaria* dan *Porphyra*, memiliki pigmen merah yang dominan dan beberapa jenisnya digunakan dalam industri makanan dan kosmetik (García-Vaquero *et al.*, 2017). Alga coklat, seperti *kelp* dan *Sargassum*, memiliki peran penting sebagai habitat, sumber makanan, dan penyangga pantai dalam ekosistem laut (Wernberg *et al.*, 2013).

Padang lamun, seperti jenis-jenis *seagrass*, adalah tumbuhan laut vaskular yang menyediakan habitat yang penting bagi berbagai jenis organisme laut di perairan dangkal tropis dan subtropis (Orth *et al.*, 2006). Terumbu karang, struktur kalsium karbonat yang dibentuk oleh koloni hewan karang, mendukung kehidupan beragam hewan laut dan ganggang, termasuk *zooxanthellae*, yang hidup di dalamnya (Hughes *et al.*, 2018). Makroalga, atau rumput laut, seperti *kelp* dan hijau laut, memiliki peran penting dalam menyediakan habitat bagi berbagai jenis organisme laut dan sebagai sumber makanan (Werner *et al.*, 2001). Sedangkan lumut laut, yang tumbuh di berbagai substrat di perairan laut, sering menjadi makanan bagi hewan laut seperti kelomang dan kepiting, serta memainkan peran penting dalam ekosistem pantai (Schubert *et al.*, 2006).

Interaksi antara fauna dan flora laut sangat penting dalam membentuk dan mempertahankan keseimbangan ekosistem laut. Berbagai jenis interaksi ini menciptakan hubungan yang kompleks antara organisme laut dan lingkungan. Hubungan predator-mangsa adalah aspek penting dari dinamika ekosistem laut, di mana predator memburu mangsa untuk memenuhi kebutuhan makanannya. Contoh hubungan ini meliputi interaksi antara ikan predator seperti hiu dan tuna dengan ikan kecil dan krustasea sebagai mangsanya, serta paus pembunuh yang memangsa ikan paus kecil sebagai sumber makanannya. Interaksi predator-mangsa ini tidak hanya memengaruhi populasi organisme terlibat dalam hubungan tersebut, tetapi juga berdampak pada keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan. Perubahan dalam populasi predator dapat menyebabkan pergeseran dalam populasi mangsa dan pada gilirannya mempengaruhi populasi organisme lain

dalam rantai makanan. Selain itu, hubungan predator-mangsa juga memainkan peran dalam menjaga keberagaman spesies dan stabilitas ekosistem laut. Kehadiran predator yang efektif dalam mengendalikan populasi mangsa tertentu dapat mencegah peningkatan populasi yang tidak terkendali dan menjaga keseimbangan ekosistem (Ripple *et al.*, 2014).

Simbiosis adalah fenomena yang melibatkan ketergantungan antara dua spesies yang berbeda, di mana keduanya saling bergantung untuk mencapai keberhasilan hidupnya. Contoh yang menarik adalah hubungan simbiosis antara *zooxanthellae*, jenis ganggang, dan karang di terumbu karang. *Zooxanthellae* hidup di dalam jaringan karang dan melakukan fotosintesis, menghasilkan zat-zat organik yang menjadi sumber makanan bagi karang. Di sisi lain, *zooxanthellae* mendapatkan perlindungan dan sumber nutrisi dari karang, serta tempat tinggal yang aman untuk berkembang biak (Muscatine & Porter, 1977). Interaksi simbiosis antara *zooxanthellae* dan karang ini memiliki dampak yang signifikan dalam menjaga keseimbangan ekosistem terumbu karang. Fotosintesis yang dilakukan oleh *zooxanthellae* tidak hanya menyediakan makanan bagi karang, tetapi juga memproduksi oksigen yang penting bagi kehidupan organisme lain di sekitarnya. Di samping itu, perlindungan yang diberikan oleh karang terhadap *zooxanthellae* membantu dalam menjaga kelangsungan hidup mereka dalam lingkungan laut yang dinamis (Glynn, 1996).

Komitansi, atau kompetisi untuk sumber daya yang sama di lingkungan yang sama, adalah fenomena yang umum terjadi di berbagai ekosistem, termasuk dalam konteks persaingan antara spesies ikan di perairan laut. Dalam lingkungan perairan laut tertentu, berbagai spesies ikan dapat bersaing ketat untuk mendapatkan sumber makanan yang sama, seperti plankton, alga, dan organisme kecil lainnya. Persaingan ini memainkan peran penting dalam menentukan kelimpahan dan distribusi populasi ikan dalam ekosistem laut. Ketika sumber daya tertentu terbatas, komitansi dapat mengarah pada kompetisi yang intens antara spesies-spesies ikan yang bersaing untuk bertahan hidup dan berkembang biak. Studi tentang komitansi antar spesies ikan memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang strategi kompetitif yang digunakan oleh berbagai spesies untuk bertahan hidup dalam lingkungan yang serba kompetitif.

Penelitian ini juga memberikan wawasan tentang bagaimana interaksi kompetitif ini memengaruhi struktur dan fungsi ekosistem laut secara keseluruhan (Worm & Lotze, 2019).

Bab 5

EKOSISTEM LAUT DANGKAL

5.1 Konsep Ekosistem Laut Dangkal

Dalam ekologi, konsep utama adalah ekosistem, yang merupakan sistem ekologi yang dibentuk oleh hubungan timbal balik antara makhluk hidup dan lingkungannya. Suatu sistem terdiri dari bagian-bagian yang bekerja sama secara teratur. Komponen yang hidup dan tidak hidup berkumpul di suatu tempat dan berinteraksi satu sama lain untuk membentuk ekosistem. Keteraturan ekosistem terjadi karena adanya arus materi dan energi yang terkendalikan oleh arus informasi yang mengalir antara bagian-bagiannya. Masing-masing komponen memiliki relung atau fungsi. Keteraturan ekosistem terjaga selama masing-masing bagian melakukan tugasnya dan bekerja sama dengan baik. Kompleksitas ekosistem menunjukkan bahwa ekosistem tersebut berada dalam suatu bentuk keseimbangan. Keseimbangan itu berubah secara konstan. Perubahan itu dapat terjadi secara ilmiah atau sebagai akibat dari tindakan manusia.

Kita dapat membuat batas ekosistem yang kecil atau besar. Suatu ekosistem dapat dibagi dalam beberapa sub-ekosistem. Misalnya, ekosistem bumi kita dapat dibagi dalam sub-ekosistem lautan, sub-ekosistem daratan, sub-ekosistem danau, dan sub ekosistem-sungai.

Konsep ekosistem merupakan konsep yang luas, fungsi utamanya penekanan hubungan wajib, ketergantungan, dan hubungan sebab akibat, yakni perangkaian komponen-komponen untuk membentuk satuan fungsional. Cara kerjanya tidak dapat dipisahkan dari keseluruhan, ekosistem merupakan tingkat organisasi paling baik untuk teknik analisis sistem. Selama komponen pokok ada dan bekerja sama untuk mencapai kemantapan fungsional.

Pada bab ini akan dibahas terkait dengan berbagai tipe ekosistem, khususnya ekosistem laut dangkal. Ekosistem laut dangkal merupakan penggolongan ekosistem perairan berdasarkan kedalaman kolom air yang masih mampu dijangkau oleh peneterasi sinar matahari sampai ke dasar perairan.

5.2 Ekosistem Estuari

Estuaria adalah perairan yang semi tertutup sehingga air laut yang asin bercampur dengan air tawar yang berasal dari sungai sehingga sering disebut ekosistem muara. Percampuran masa air pada kawasan ini juga dipengaruhi oleh adanya pasang surut sehingga pergerakan masa air sangat dinamis.

Perpaduan pengaruh dari air laut dan air tawar akan menciptakan suatu kumpulan yang unik ketika kondisi lingkungan yang berbeda-beda (Aris *et al.*, 2018), antara lain:

1. Tempat bertemunya arus air tawar dengan arus pasang surut, yang mempunyai pengaruh berlawanan terhadap sedimentasi, pencampuran air, dan sifat fisik lainnya.
2. Pencampuran kedua jenis air ini akan memberikan sifat fisik khusus pada lingkungan yang tidak sama dengan air sungai atau laut.
3. Perubahan yang diakibatkan oleh pasang-surut air ini akan menuntut masyarakat untuk melakukan perubahan fisiologis pada lingkungan sekitarnya.
4. Tingkat salinitas di perairan estuari ini bergantung pada pasang surut air laut, air tawar dan arus lainnya, serta topografi estuari tersebut.

Secara umum, estuaria memiliki berbagai fungsi ekologis yang signifikan, termasuk sebagai sumber zat hara dan bahan organik yang diangkut melalui sirkulasi pasang surut (*tidal circulation*), tempat tinggal bagi banyak spesies hewan yang bergantung pada estuaria sebagai tempat berlindung dan mencari makanan (*feeding ground*), dan tempat untuk bereproduksi dan/atau tumbuh besar. Perairan estuaria biasanya dimanfaatkan oleh sebagian manusia untuk tinggal dan menetap, pengembangan kawasan industri, transportasi air, pelabuhan perikanan, daerah penangkapan ikan dan budidaya tambak (Bengen, 2004).

Secara geomorfologi estuari memiliki 4 tipe (Pritchard 1967) yaitu:

1. Estuari dengan penghalang pasir
Estuari dengan pasir penghalang, juga dikenal sebagai estuari dengan *bar-built*, adalah cekungan dangkal di mana saat air surut, sebagian dasar perairannya muncul. Perairan ini disebut sebagai perairan semi tertutup disebabkan ada pasir penghalang. Proses terbentuknya pasir penghalang disebabkan meningkatnya permukaan laut yang menjadikan pasir terperangkap dan menjadi bukit pasir (Rositasari & Rahayu, 1994).
2. Estuari bertipe *fyord*
Estuari tipe *fyord* ini terbentuk di pinggir sungai yang berlembah dalam karena aliran es (gletser) tererosi. Sebagai hasil dari terkikis aliran gletser, estuari jenis ini biasanya memiliki lembah dengan penampang berbentuk huruf U, bertebing curam, dan dasar yang berbatu-batu. Di titik terdalamnya, estuari ini dapat mencapai kedalaman lebih dari 300 meter. Namun, ujungnya dangkal karena endapan serpih batu-batuan acap membentuk gigir di bawah air.
3. Estuari rataan tergenang
Memiliki karakteristik pantai yang lebar dengan kedalaman air yang dangkal. Aliran Sungai pada musim penghujan membawa endapan sedimen ke Kawasan estuari. Ciri khasnya saat musim kemarau air laut mendominasi genangan estuari sehingga airnya memiliki sailintas tinggi.
4. Estuari yang terbentuk oleh proses vulkanik
Estuari tipe ini dikarenakan terjadinya perubahan muka bumi, bentuknya yang unik akibat proses geologis. Massa air tawar yang masuk dari darat debitnya sangat besar.

Berdasarkan adaptasinya organisme di lingkungan estuaria mempunyai 3 (tiga) tipe adaptasi (Kennish, 1990), yaitu :

1. Adaptasi morfologis
Organisme yang hidup di substrat berlumpur sering kali beradaptasi dengan membuat rumbai-rumbai kecil, rambut, atau *setae* untuk menjaga jalan masuk ke ruang pernapasan agar partikel lumpur tidak menutup permukaannya. Kepiting estuaria dan beberapa anggota gastropoda memiliki kemampuan adaptasi seperti ini. Adaptasi lain adalah ukuran tubuh. Organisme estuaria biasanya memiliki ukuran

tubuh lebih kecil dibandingkan dengan kerabatnya yang hidup di laut, seperti kepiting (*Ucha*), yang memiliki ukuran kecil karena sebagian besar energi yang dimilikinya digunakan untuk beradaptasi dengan kadar garam di lingkungannya.

2. Adaptasi fisiologis

Untuk kelangsungan hidup organisme estuaria, adaptasi diperlukan untuk menjaga keseimbangan cairan tubuh saat salinitas luar berubah. Kemampuan untuk osmoregulasi sangat penting untuk bertahan hidup. Upaya untuk menyeimbangkan tekanan osmosis sangat dipengaruhi oleh suhu. Di daerah lintang rendah dengan kondisi suhu perairan hangat dijumpai spesies estuaria dan sering ditemui juga spesies yang bermigrasi dari laut.

3. Adaptasi tingkah laku

Membuat lubang ke dalam lumpur adalah salah satu cara organisme estuaria mengubah tingkah lakunya. Organisasi yang beradaptasi ini memiliki dua keuntungan yaitu pengaturan osmoregulasi. Ketika organisme berada di dalam lubang, mereka memiliki kesempatan untuk berinteraksi dengan air interstitial yang memiliki salinitas dan suhu yang lebih rendah daripada air di atasnya. Selain itu, ketika mereka dibenamkan pada substrat, kemungkinan kecil akan dimangsa yang hidup di permukaan substrat. Berpindah ke hilir dan hulu adalah adaptasi tingkah laku lainnya. Organisme akan tetap berada di kisaran toleransinya dengan cara ini (Kramer, 1994).

5.3 Ekosistem Mangrove

Menurut Snedaker (1978) *dalam* Kusmana (2003), mangrove adalah kelompok jenis tumbuhan yang tumbuh di sepanjang garis pantai dari tropis hingga sub-tropis. Mereka sangat cocok di lingkungan dengan garam dan bentuk lahan pantai yang disebabkan oleh reaksi tanah anaerob. Mangrove hidup di habitat payau. Tanaman dikotil memiliki buah berbiji berbelah dua. Di wilayah mangrove, kelompok pohon dapat terdiri dari satu jenis pohon atau sekumpulan komunitas pohon yang dapat hidup di air asin. Ada hutan di sepanjang pantai wilayah tropis dan subtropis. Mangrove menggabungkan ciri-ciri tumbuhan darat dan laut, yang membuatnya unik. Jenis akar mangrove yang timbul biasanya adalah jenis akar nafas atau pneumatofor. Sistem perakaran ini membantu

menyesuaikan diri dengan kondisi tanah yang miskin oksigen hingga anaerob.

Tumbuhan yang dapat hidup pada ekosistem mangrove dikenal sebagai halofit, yang berarti mereka umumnya basa dan tahan terhadap salinitas air laut. Di Indonesia, hutan mangrove sering disebut "hutan bakau", tetapi istilah ini tidak tepat karena bakau (*Rhizophora*) adalah salah satu famili tumbuhan yang banyak ditemukan di ekosistem mangrove yang sangat bervariasi. Vegetasi mangrove biasanya halofit. Tumbuhan *Avicenniaceae*, *Combretaceae* (*teruntum*), *Arecaceae* (*sopalm*), *Rhizophoraceae* (*mangrove*), dan *Lythraceae* (*sonneratia*) hidup di ekosistem mangrove. Namun, hewan yang hidup ekosistem mangrove sangat beragam, yaitu dari golongan vertebrata pisces, burung, dan amfibi hingga invertebrata seperti serangga, krustasea, moluska, dan invertebrata lainnya seperti anemon laut, cacing, dan karang.

Salah satu karakteristik ekosistem mangrove adalah tanahnya yang berlumpur, berlempung, atau berpasir dengan bahan-bahan yang berasal dari lumpur, pasir, atau pecahan karang. Air laut sering mengalir ke dalam hutan, baik setiap hari maupun hanya pada saat pasang purnama. Komposisi vegetasi ekosistem mangrove akan dipengaruhi oleh frekuensi genangan ini. Menerima pasokan air tawar dari darat yang cukup (sungai, mata air, atau air tanah) yang menurunkan salinitas dan meningkatkan pasokan hara dan lumpur.

5.3.1 Jenis-Jenis Mangrove

Pada umumnya, mangrove tumbuh terbagi dalam 4 zona yaitu daerah terbuka, daerah tengah, daerah yang memiliki sungai yang berair payau sampai air tawar, serta daerah kearah daratan yang memiliki air tawar.

a. Mangrove Terbuka

Avecenia, atau *sonneratia*, adalah jenis tumbuhan yang biasanya mendominasi mangrove di tepi laut karena arus mengangkutnya ke tempat berpasir secara alami.

b. Mangrove Tengah

Di belakang mangrove zona terbuka, jenis *Rhizophora mucronata*, *Rhizopra apiculata*, *Xylocarpus granatum*, dan *Bruguera* biasanya mendominasi mangrove tengah.

c. Mangrove Payau

Di zona ini, dikuasai dari jenis mangrove *Nypa* sp.

d. Mangrove Darat

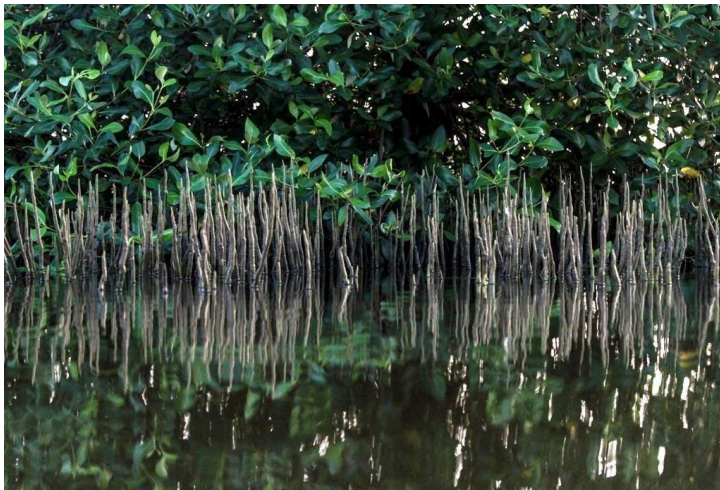
Di daerah ini, mangrove daratan tumbuh di air payau yang hampir tawar, banyak ditemukan *Cerbera mangas* dan *Acrostichum* sp.

Ekosistem mangrove dapat didefinisikan sebagai ekosistem yang terdiri dari makhluk hidup (baik hewan maupun tumbuhan) yang berinteraksi dengan faktor lingkungannya di lingkungannya. Di dalam habitatnya, ekosistem mangrove dapat menghasilkan berbagai produk dan jasa yang tidak sepenuhnya bernilai ekonomi.

Ada 5 jenis mangrove yang umum ditemui di Indonesia, yaitu *Avicennia*, *Sonneratia*, *Ceriops*, *Bruguiera*, *Rhizophora*.

1. *Avicennia*

Jenis mangrove ini juga disebut api-api atau mangi-mangi. Salah satu ciri khas mangrove ini adalah akarnya yang berbentuk runcing yang menonjol ke atas permukaan air untuk berfungsi sebagai akar napas (**Gambar 5.1**). Bagian bawah daunnya berwarna putih.



Gambar 5.1 Jenis Mangrove *Avicennia*

(Sumber: <https://www.mongabay.co.id/2019/06/23/foto-ini-ragam-produksi-mangrove-si-api-api/>)

2. *Sonneratia*

Nama-nama lokal untuk *sonneratia* ini adalah pidada, perepat, pedada, bangka, dan posi-posi. Pernapasan akarnya mirip dengan *Avicennia*, dengan pneumatophora yang berbentuk pensil (**Gambar 5.2**). Bentuk daun, buah, dan bunga kedua spesies tersebut membedakannya satu sama lain.



Gambar 5.2 Jenis Mangrove *Sonneratia*

(Sumber: https://inaturalist.ca/taxa/196661-Sonneratia-alba/browse_photos)

3. *Ceriops*

Jenis *Ceriops* sering disebut sebagai tangar, palun, atau bido-bido, memiliki akar tunjang dengan banyak cabang dan buah yang memanjang dengan bentuk batang yang cenderung agak berisi di bagian pangkal (**Gambar 5.3**).



Gambar 5.3 Jenis Mangrove *Ceriops*

(Sumber: <https://tidechaser.blogspot.com/2011/11/tengar-ceriops-tagal.html>)

4. *Bruguiera*

Akar jenis ini berbentuk seperti lutut yang menyiku dan menyerupai huruf "U" yang terbalik (**Gambar 5.4**). Berus, tumu, tongke, putut, dan kendeka adalah nama lokal untuk jenis ini. Indonesia memiliki enam jenis *Bruguiera*: *cylindrica*, *gymnorhiza*, *haennessii*, *parviflora*, *sexangula*, dan *exaristata*.



Gambar 5.4 Jenis Mangrove *Bruguiera*
(Sumber: <https://kemangteerjakarta.wordpress.com/jenis-mangrove/bruguiera-gymnorrhiza/>)

5. *Rhizophora*

Jenis *Rhizophora* ini termasuk jenis *mucronata*, *stylosa*, dan *apiculata* di Indonesia, dan mereka memiliki akar yang sejenis dengan *Ceriops*, yaitu akar tunjang, hanya saja *Rhizophora* sedikit lebih besar (**Gambar 5.5**). Bunganya membedakan semuanya.



Gambar 5.5 Jenis Mangrove *Rhizophora*
(Sumber: <https://www.shutterstock.com/id/image-photo/rhizophora-mucronata-species-mangrove-found-on-1122509033>)

5.3.2 Fungsi dan Manfaat Hutan Mangrove

Berbagai makhluk darat dan perairan hidup dan *reproduce* di habitat mangrove. Ekosistem mangrove berfungsi sebagai plasma nutfah serta menopang kehidupan di sekitarnya. Ekosistem ini untuk habitat fauna mendapatkan makanan, mendapatkan perawatan, berkembang biak, bertelur dan memijah, dan berlindung dari krustasea dan ikan kecil yang menyerang mereka. Hutan mangrove memiliki banyak hubungan dengan pemenuhan kebutuhan manusia, termasuk makanan, dan Kesehatan. Fungsi ekosistem mangrove menurut Arief (2007) adalah sebagai berikut.

- a. Manfaat fisik mangrove
 - Menjaga garis Pantai tetap stabil; melindungi pantai dari adanya abrasi, dan pelindung dari angin kencang yang datang dari arah laut.
 - Perangkap sedimen hingga timbul daratan baru. Sebagai tempat di mana air laut masuk atau rembes ke darat atau sebagai filter air asin menjadi tawar.
- b. Manfaat kimia ekosistem mangrove
 - Sebagai lokasi di mana proses daur ulang menghasilkan oksigen.
 - Berfungsi sebagai penyerap karbondioksida
 - sebagai pengolah limbah yang berasal dari pencemaran industri dan kapal laut.
- c. Manfaat biologi ekosistem mangrove
 - Sebagai penghasil bahan pelapukan, pemakan bahan pelapukan merupakan sumber makanan penting bagi invertebrata kecil; hewan yang lebih besar kemudian memakannya sebagai sumber makanan.
 - Sebagai tempat untuk memijah atau mengasuh udang, ikan, kepiting, dan hewan lainnya yang akan kembali ke lepas pantai setelah dewasa.
 - Sebagai tempat berlindung dan berkembang biak bagi burung dan hewan lainnya.
 - sebagai sumber genetika dan plasma nutfah.
 - Sebagai rumah bagi berbagai jenis biota laut dan darat.

d. Manfaat ekonomi ekosistem mangrove

- Memberikan pendapatan kepada masyarakat, industri, dan negara.
- Penghasil kayu sebagai bahan bangunan dan furnitur rumah tangga, serta kayu bakar dan arang.
- Pembuat bahan mentah untuk industri seperti pulp, kertas, tekstil, makanan, obat-obatan, dan kosmetik.
- Produsen bibit ikan, udang, kerang, kepiting, telur burung, madu, dan telur.

5.4 Ekosistem Lamun

Menurut Philips dan Menez (1988), ekosistem lamun adalah salah satu ekosistem bahari yang produktif di perairan dangkal. Ini menjaga sedimen dari arus dan gelombang (*sediment trap*), melindungi hewan di padang lamun, membantu organisme epifit yang menempel pada daun, produktif, dan menfiksasi karbon di kolom air. Karbon ini sebagian masuk ke sistem rantai makanan dan sebagian lagi tersimpan dalam biomassa dan sedimen.

Tumbuhan lamun, juga dikenal sebagai *seagrass*, tumbuh di bawah permukaan laut dangkal (Permana *et al.*, 2016). Cahaya, suhu, salinitas, sedimen, nutrisi, dan suhu perairan memengaruhi distribusi lamun (Dewi *et al.*, 2016). Lamun atau *seagrass* tumbuh pada substrat berlumpur, berpasir hingga berbatu. Mereka juga memiliki bunga, buah, daun, dan akar yang sebenarnya (Sjafrie *et al.*, 2018). Itu sebabnya lamun dianggap sebagai tumbuhan tingkat tinggi, sama seperti tumbuhan daratan. Ada 58 spesies lamun di seluruh dunia (Kuo & McComb, 1989) dengan konsentrasi utama di wilayah Indo-Pasifik. 16 spesies dari 7 genus ditemukan di Asia Tenggara, dengan 16 spesies yang paling banyak ditemukan di Filipina. Di Indonesia, 12 spesies dari 7 genus ditemukan.

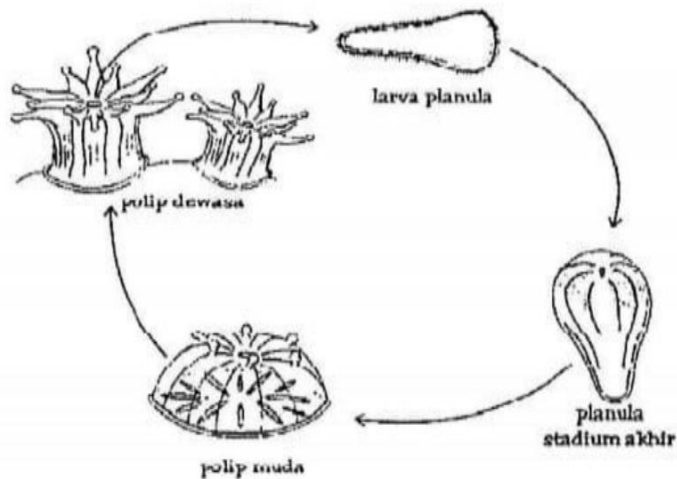
Padang lamun memiliki berbagai jenis biota laut, termasuk yang berharga secara ekonomi seperti ikan baronang rajungan, kepiting, teripang, dan lain-lain. Orang menggunakan biota ini sebagai sumber makanan mereka dan sebagai tempat tinggal bagi berbagai jenis biota laut lainnya, terutama dugong dan ikan baronang yang hampir punah.

5.5 Ekosistem Terumbu Karang

Di perairan tropis, ekosistem terumbu karang terdiri dari biota laut yang menghasilkan kapur, terutama jenis karang batu dan alga berkapur. Selain itu, ekosistem ini juga terdapat biota dasar laut lainnya, seperti jenis tunikat, krustasea, porifera, echinodermata, dan polychaeta. Terumbu karang adalah bentukan fisiografi yang terbentuk di air laut tropik dan terutama terdiri dari kerangka kapur yang terbentuk oleh karang hermatipik. Komponen utama terumbu karang adalah biota karang. Baik karang hermatipik maupun karang ahermatipik berbeda dalam pertumbuhannya. Karang hermatipik bersimbiosis dengan *zooxanthellae* dan hanya ditemukan di lintang tropis (Nybakken, 1992).

Zooxanthellae berperan mensintesis karbondioksida, nitrat, dan fosfat saat polip karang mengendap kapur. Karena proses ini, karang hermatipik dapat membentuk terumbu. *Zooxanthellae* membantu proses respirasi jenis karang hermatipik. Fotosintesa alga memastikan bahwa gas oksigen (O_2) tersedia untuk metabolisme karang dan pernafasannya. Berkembang biak karang dapat terjadi dalam dua cara: seksual (generatif) dan aseksual (vegetatif) (Nybakken, 1992).

Perkembangbiakan secara seksual terjadi ketika sel kelamin jantan (sperma) mencapai sel kelamin betina (ovum) di ruang gastrovaskur. Saat proses pembuahan berakhir, planula, atau larva, akan dibentuk. Ukuran mereka adalah 1.20 mikron. Planula awalnya berbentuk masif dengan silia di seluruh tubuhnya dan hidup dalam rentang waktu tertentu. Setelah itu, di salah satu ujungnya terbentuk mulut, yang mengarah pada pembentukan rongga tubuhnya. Saat hewan menemukan substrat yang sesuai, dia akan melekat dengan mulut di sebelah atas dan mengeluarkan zat untuk memperkuat kedudukannya. Selanjutnya akan membentuk kerangka kapur bersekat-sekat melalui proses yang dikenal sebagai metamorfosa (Nybakken, 1992). Secara umum, proses produksi organisme akuatik dapat dilihat pada **Gambar 5.6**.



Gambar 5.6 Produksi Organisme Akuatik Secara Global
(Sumber: Nybakken, 1992)

Terumbu karang merupakan bagian penting dari ekosistem laut, terumbu karang sangat penting untuk kelangsungan hidup biota laut seperti ikan dan biota laut lainnya. Oleh karena itu, semua kehidupan yang ada di dalam ekosistem terumbu karang adalah salah satu sumber daya alam yang sangat berharga. Dengan air yang jernih, suhu air yang hangat, energi ombak, sirkulasi yang sempurna antara sungai dan laut, dan jauh dari resedimentasi.

Nilai ekonomi terumbu karang di Indonesia sebesar 4,2 milyar USD dari segi perikanan, wisata, dan perlindungan laut belum termasuk nilainya sebagai pelindung pantai, sumber sedimen pantai, dan penyangga kehidupan pesisir. Nilai konservasi terumbu karang termasuk sebagai sumber makanan dan hiasan, dan sebagai penyangga proses ekologis dan sumber kehidupan pesisir (Suharsono, 1996).

Sebagai salah satu ekosistem laut yang paling kaya akan keanekaragaman hayati, terumbu karang menampung ribuan spesies biota laut, termasuk ikan, krustasea, moluska, reptil laut, dan mamalia laut. Semua ini memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan (Rizal *et al.*, 2016). Untuk kelangsungan hidup spesies-spesies ini, terumbu karang harus tetap sehat dan lestari karena menyediakan tempat berlindung, mencari makan, dan memijah (Hermansyah & Febriani, 2020).

Struktur serta komposisi komunitas karang di beberapa wilayah terumbu jenisnya beda berdasarkan puncak terumbu, kemiringan terumbu karang ke arah laut, dan zona eksposur yang mengalami terpaan ombak di dataran terumbu mengarah ke dataran (Barnes & Hughes, 1990). Kawasan ini memiliki komunitas karang yang kokoh dengan cabang pendek. Berdasarkan pada formasi struktur komunitas karang menurut penyebarannya pada daerah pantai, maka terbagi beberapa zona karang, yaitu:

- a. Zona dalam terdiri dari substrat pasir dan pecahan karang yang ditumbuhi lamun.
- b. Zona karang campuran, di sini terdapat beberapa jenis karang, seperti *Goniostrea* sp., *Acropora* sp., *Leptoria* sp., *Favia*, *Heliopora coerulea*, dan *Favites abtida*.
- c. Zona *Acropora formosa* berada di bagian tengah dari zona karang bercampur, dengan *Acropora formose* didominasi dan diselingi oleh *Favia*, *Favites*, *Goniostrea*, dan *Leptoria*.
- d. Daerah luar terdiri dari karang *Leptoria phrygia*, *Acropora* spp., *Echinopora lamellosa*, *Pocillopra*, dan *Goniostrea retiformis* di atas kemiringan laguna.
- e. *Acropora formosa*, *Echinopora lamellosa*, *Helomitra*, *Herpolitha*, dan *Fungia*, menempati zona karang terumbu dari puncak ke dasar.

Bab 6

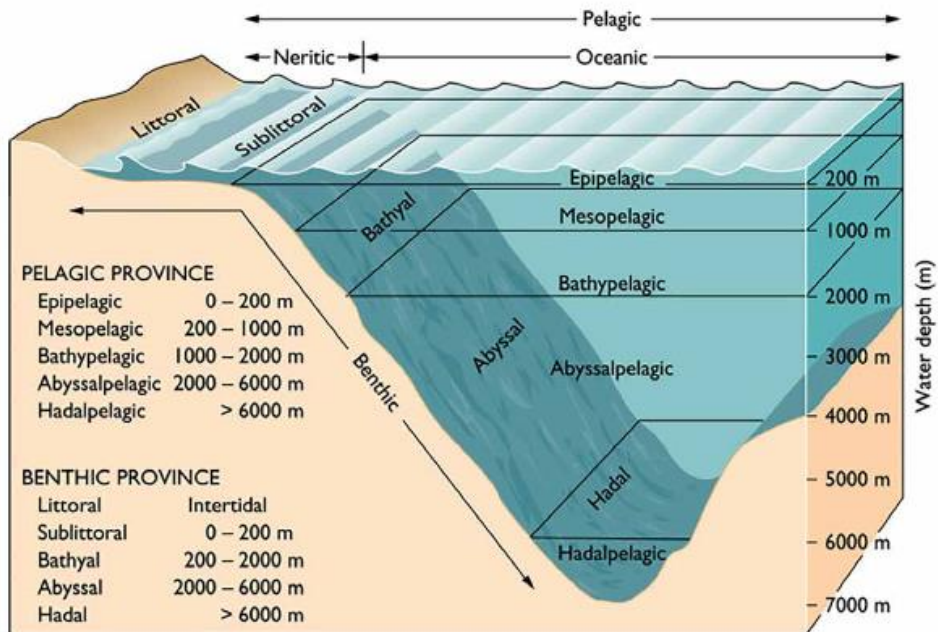
EKOSISTEM LAUT DALAM

Ekosistem laut dalam merupakan ekosistem terbesar di di bumi, namun masih sedikit dieksplorasi. Dari sekitar 71% tutupan perairan di permukaan bumi, 65% merupakan wilayah perairan dengan kedalaman rata-rata 3800 meter. Dari persentase tersebut, baru 5% dari ekosistem laut dalam yang telah dieksplorasi dan hanya 0,01% wilayah yang telah dipelajari secara rinci. Hal ini menunjukkan bahwa ekosistem laut dalam memiliki potensi yang sangat besar untuk dieksplorasi dan diungkap secara mendalam mengenai kondisi lingkungan dan organisme yang mendiami wilayah tersebut (Ramirez-Llodra, 2020).

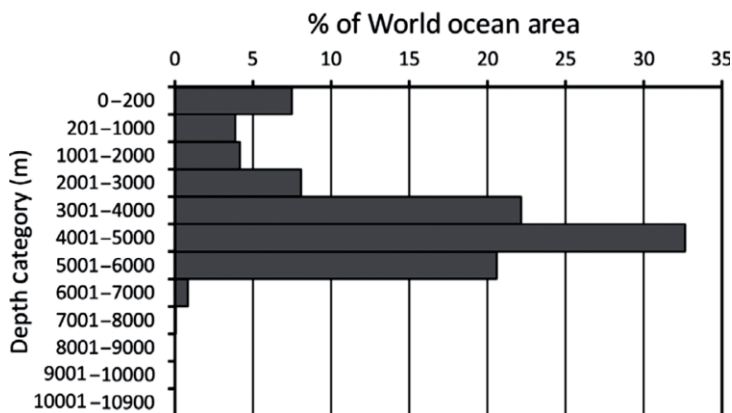
6.1 Habitat Laut Dalam

Berdasarkan kedalamannya, zonasi laut (**Gambar 6.1**) dibagi menjadi empat kategori kedalaman yaitu : perairan dangkal dengan kedalaman 0-200 m; landas kontinen (*continental shelf*) dengan kedalaman 200 – 1000 m; zona batial (*bathyal zone*) yang terdiri dari lereng sekitar benua, pulau, bukit dan gunung laut dengan kedalaman 1000 – 3000 m; zona abisal (*abisal zone*) dengan kedalaman antara 3000 – 6.000 m; serta zona hadal (*hadal zone*) yang merupakan dasar palung dengan kedalaman lebih dari 6.000 m (Sayre et al., 2017).

Laut dalam (*deep sea*) didefinisikan sebagai wilayah perairan terbuka yang memiliki kedalaman sampai 1000 meter. Zona abisal dengan kedalaman antara 4000 – 5000 m menunjukkan persentase tertinggi hingga 33% dibandingkan zona batial dan hadal (**Gambar 6.2**). Secara geologis, habitat laut dalam didominasi oleh struktur palung, ngarai, gunung laut, dan saluran hidrotermal yang mendukung komunitas mikroba dan fauna yang unik (Lldora & Billett, 2006).



Gambar 6.1 Pembagian Zonasi Laut Secara Vertical dan Horizontal
(Sumber: Sayre *et al.*, 2017)



Gambar 6.2 Persentase Kedalaman Lautan Dunia
(Sumber: Priede, 2017)

Secara umum, laut dalam memiliki karakteristik lingkungan yang gelap dan ekstrim. Energi matahari tidak mampu menembus sampai pada kedalaman ini sehingga produktivitas primer di habitat ini sangat rendah.

Selain itu, habitat ini memiliki keanekaragaman mikroba terbesar yang berperan penting dalam memediasi siklus biogeokimia global. Dalam kaitannya dengan asal energi yang digunakan untuk proses metabolisme organisme, habitat laut dalam dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu habitat heterotrofik dan kemotolitik. Di habitat heterotrofik, komunitas fauna bergantung pada bahan organik yang berasal dari organisme permukaan yang mati dan tenggelam dalam sedimen, sedangkan habitat kemotolitik ditopang oleh energi yang berasal dari reduksi bahan anorganik seperti hydrogen sulfide (H_2S) atau metana (CH_4) dari lapisan bumi bagian dalam (Lidz & Billett, 2006).

6.1.1 Habitat Heterotrofik

6.1.1.1 Tepi Benua (*Continental margin*)

Tepi benua mencakup 13% dari dasar laut dunia. Wilayah ini merupakan reservoir sedimen terbesar di dunia (hingga 90%) yang berasal dari erosi daratan. Daerah tepi benua ini sangat dipengaruhi oleh aktivitas dinamis seperti arus yang mempengaruhi distribusi nutrisi dan bahan organik terutama pada lapisan permukaan. Sedangkan pada kedalaman lebih dari 1000 m, faktor lingkungan seperti geologi, suhu, arus dalam dan massa air menjadi faktor penentu utama dalam distribusi, komposisi dan keanekaragaman fauna (Rowe et al., 1982).

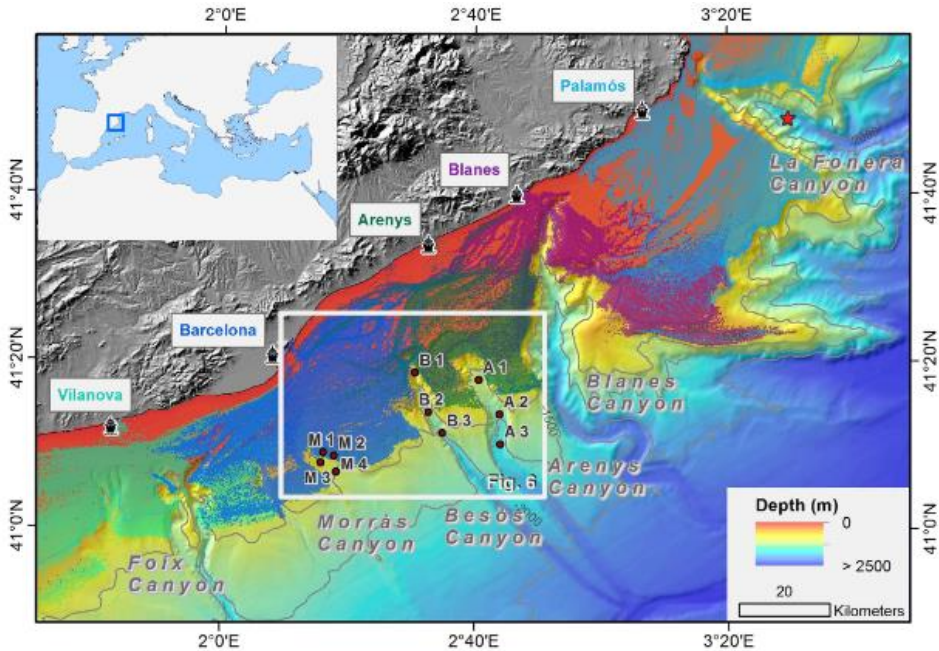
6.1.1.2 Ngarai (*Canyon*)

Ngarai merupakan bagian tepi benua yang dicirikan dengan keanekaragaman hayati yang tinggi seperti di Laut Catalan (**Gambar 6.3**) dan Laut Selatan Prancis yang merupakan tepi Benua Eropa. Tingginya keanekaragaman hayati di wilayah ngarai disebabkan karena tingginya aliran karbon organik dan beragamnya jenis substrat mulai dari dinding batuan keras hingga sedimen bergerak yang dapat menopang ekosistem yang kompleks (Babonneau et al., 2002).

6.1.1.3 Terumbu Karang Laut Dalam

Daerah ini ditemukan pada sepanjang tepi Samudera Atlantik Timur Laut dan Barat Laut pada kedalaman sekitar 1000 m dan membentang dari Norwegia hingga Portugal. Ekosistem serupa baru-baru ini juga ditemukan di Laut Mediterania. Spesies karang air dalam

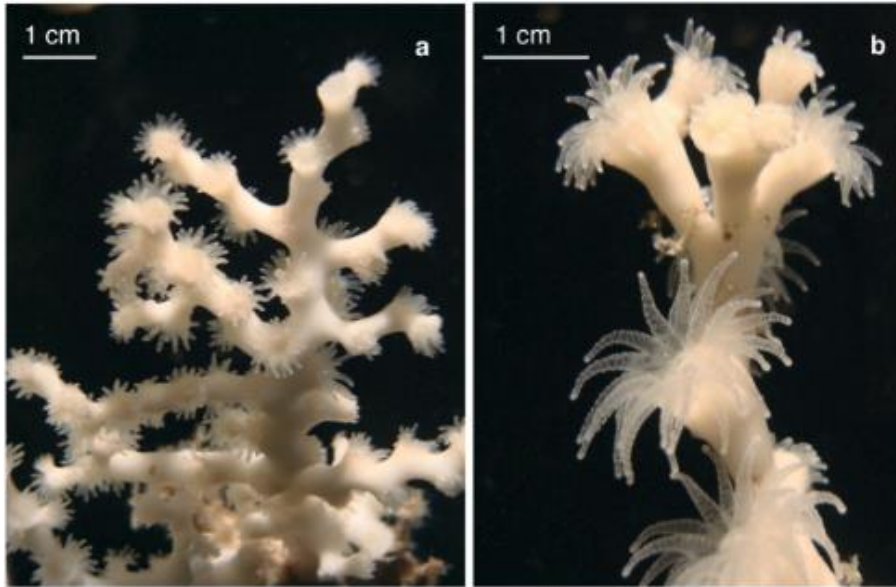
seperti *Madrepora oculata* (Gambar 6.4a) dan *Lophelia pertusa* (Gambar 6.4b) membentuk terumbu karang karbonat yang menyediakan tempat berlindung, tumbuh, dan bereproduksi spesies lain seperti spons, *soft coral*, moluska, krustasea, dan echinodermata (Cairns, 2007).



Gambar 6.3 Ngarai di Laut Catalan
(Sumber: Paradis *et al.*, 2017)

6.1.1.4 Gunung Laut

Gunung laut dicirikan oleh lereng yang curam, adanya substrat keras dan lunak, ketinggian gunung yang cukup besar, mulai dari zona sublitoral (kedalaman <200 m) hingga abisal (kedalaman 3000-6000 m). Diperkirakan terdapat sekitar 100.000 gunung laut setinggi lebih dari 1000 m di seluruh lautan di dunia dan jumlahnya lebih banyak lagi jika ditambah dengan gunung laut yang lebih kecil. Namun hanya sekitar 350 gunung laut yang telah dieksplorasi dan hanya sekitar 100 gunung yang telah dipelajari secara mendalam. Ciri biologis dari gunung laut yaitu memiliki produktivitas yang tinggi, keanekaragaman jenis ikan yang tinggi serta tingkat endemisme fauna benthik yang tinggi (Shank, 2010).



Gambar 6.4 *Madrepora oculata* (a); *Lophelia pertusa* (b)
(Sumber: Orejas *et al.*, 2011)

6.1.1.5 Area Minim Oksigen (*Oxygen Minimum Zone/OMZ*)

OMZ merupakan daerah dengan konsentrasi oksigen rendah (< 0,5 ppm) yang terbentuk di daerah dengan produktivitas primer tinggi dan sirkulasi air yang buruk. Hal ini menyebabkan degradasi bahan organik dari substansi biologis yang tenggelam sehingga menyebabkan penurunan kandungan oksigen. OMZ dalam perairan laut terjadi pada kedalaman antara 200 – 1000 m yang ditemukan di Laut Pasifik Timur dan Barat Laut, wilayah Filipina, Teluk Benggala, Laut Arab dan Afrika Barat Daya (Paulmier & Ruiz-Pino, 2009).

Meskipun konsentrasi oksigen minim, kehidupan beberapa protozoa dan metazoan dapat berjalan dengan baik. Selain itu, tingginya bahan organik menjadi substrat pertumbuhan bakteri pengoksidasi sulfide seperti *Beggiatoa*, *Thioploca*, dan *Thiomaria*. Kelompok hewan lain seperti foraminifera, nematode, ciliate, flagellate, gastropoda dan bivalvia juga dapat hidup di daerah ini dengan mengembangkan teknik adaptasi yang berbeda (Childress & Seibel, 1998).

4.1.1.6 Dataran Abisal

Dataran abisal berada pada kedalaman 3000-6000 m yang ditutupi oleh sedimen halus yang tebal hingga ribuan meter. Karakteristik utama lingkungan perairan di dataran abisal yaitu suhu yang rendah (sampai -2 °C), salinitas tinggi (35-39 ppt), tidak ada cahaya dan tekanan atmosfer yang tinggi (Hernández-Molina *et al.*, 2008).

Berbagai fauna telah ditemukan menghuni daerah ini mulai dari meiofauna (hewan berukuran mikron), makrofauna (hewan berukuran millimeter) hingga megafauna (hewan berukuran sentimeter). Meiofauna didominasi oleh nematode dan foraminifera, sedangkan makrofauna didominasi oleh polichaeta, krustasea, moluska, dan nemertean. Megafauna didominasi oleh echinodermata, krustasea, ikan dan cnidarian sessile (Durden *et al.*, 2015).

6.1.2 Habitat Kemosintetik

6.1.2.1 Kawasan Hidrotermal

Daerah ini ditemukan pada tahun 1977 di Kepulauan Galapagos, Pasifik yang merupakan pertemuan dua lempeng tektonik dari gunung api aktif. Pada area ini, terjadi pertemuan air laut yang dingin (2 °C) yang menembus celah kerak bumi dengan material magma yang sangat panas (350 °C) yang menghasilkan asap hitam pekat dan mengendapkan logam-logam disekitarnya (Van Dover & Lutz, 2004).

Secara mengejutkan, ditemukan beberapa organisme yang mampu hidup dengan kondisi ekstrim tersebut. Hewan tersebut mampu memanfaatkan energy bahan kimia yang tereduksi melalui proses microbial sebagai pengganti energy matahari. Beberapa hewan yang mampu hidup pada ekosistem hidrotermal antara lain cacing tabung *Riftia pachyptila* (**Gambar 6.5**), krustasea (udang, kepiting, amphipod), moluska dan polichaeta (Mullineaux, 2014).



Gambar 6.5 *Riftia pachyptila*
(Sumber: Rodriguez-sanchez, 2019).

6.1.2.2 Mata Air Dingin

Kawasan ini ditemukan pada tahun 1983 pada kedalaman sekitar 500 m di Western Florida, Teluk Meksiko. Wilayah ini dicirikan dengan adanya rembesan air dingin dengan konsentrasi metana dan H_2S yang tinggi. Dengan adanya metana dan H_2S tersebut, merangsang bakteri kemoautotrof untuk memanfaatkannya sebagai sumber energi pengganti matahari dalam proses penguraian bahan organik. Hingga saat ini, mata air dingin telah ditemukan di beberapa lokasi seperti lereng Carolina, Laut Barents, Teluk Guinea, dan Laut Mediterania Timur (Westbrook *et al.*, 2009).

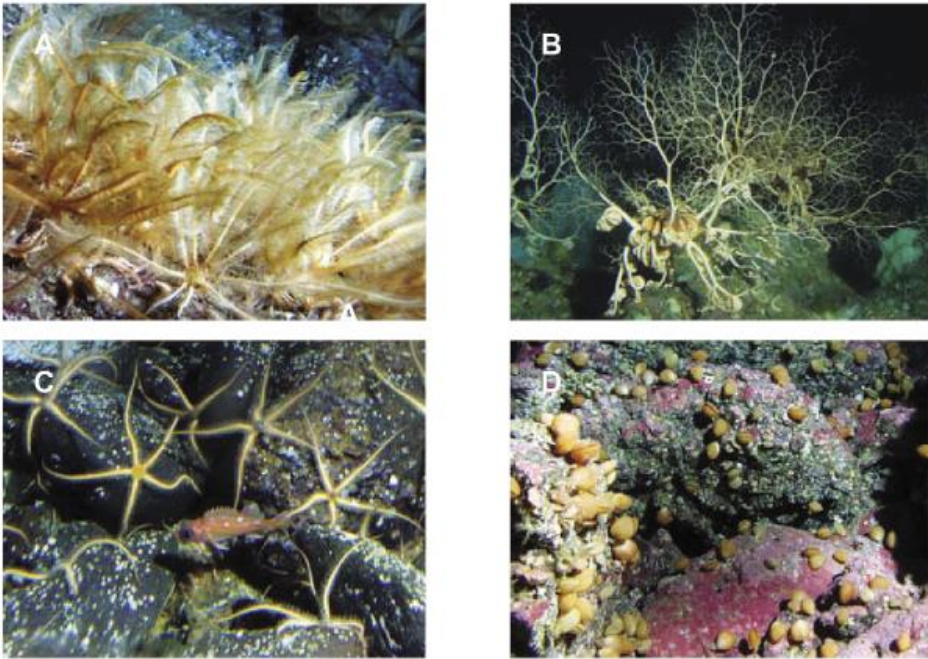
Beberapa spesies hewan telah dilaporkan mendiami wilayah mata air dingin yang bersimbiosis dengan bakteri kemoautotrof. Kelompok utamanya adalah cacing tabung Lamellibranchia (**Gambar 6.6**), spons, moluska dan krustasea ditemukan melimpah di kawasan tersebut (Sen *et al.*, 2016).



Gambar 6.6 *Lamellibranchia columna*
(Sumber: McCowin *et al.*, 2019)

6.2 Fauna Laut Dalam

Jenis organisme yang menghuni ekosistem laut dalam secara umum berasal dari golongan hewan bertulang belakang (vertebrata) dan tidak bertulang belakang (avertebrata/invertebrate). Hewan vertebrata didominasi oleh golongan ikan (*fishes*) sedangkan hewan invertebrata memiliki keanekaragaman yang lebih tinggi yang berasal dari filum echinodermata (hewan bertubuh duri), moluska (hewan bertubuh lunak), krustasea (hewan bercangkang), cnidaria (hewan bersengat) dan sebagian kecil porifera (hewan berongga), foraminifera dan polychaeta (cacing beruas) (Cartes *et al.*, 2004). Beberapa organisme invertebrata laut dalam dapat dilihat pada **Gambar 6.7**.



Gambar 6.7. Beberapa Organisme Invertebrata Laut Dalam Crinoids (*Florometra serratissima*) (A); Basket stars (*Gorgonocephalus eucnemis*) (B); Brittle stars (*Ophiacantha* spp.) (C); Brachiopods (*Terebratulida*) (D)

(Sumber: Tissot *et al.*, 2006)

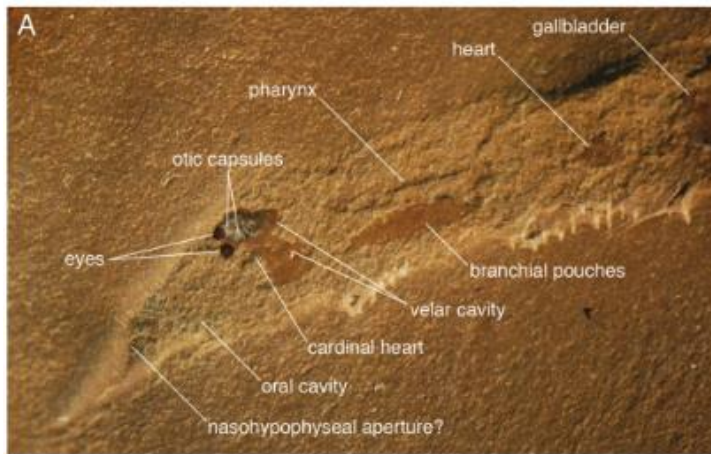
6.2.1 Hewan Bertulang Belakang (Vertebrata)

Vertebrata yang menghuni ekosistem laut dalam didominasi oleh golongan ikan. Ikan laut dalam pertama kali muncul pada akhir masa Kambrium, sekitar 500 juta tahun lalu. Dalam kurun waktu 100 juta terakhir, terjadi peningkatan jumlah famili ikan dari sebelumnya kurang dari 50 famili menjadi lebih dari 300 famili. Hal ini terjadi karena adanya invasi/perpindahan oleh ikan-ikan laut dalam serta pembentukan wilayah laut dalam baru setelah terpecahnya Pangaea dan Samudera Atlantik (Baucona *et al.*, 2023).

6.2.1.1 Agnatha

Agnatha/*hagfish* (ikan tanpa rahang) hanya diwakili oleh satu kelas yaitu Myxini sedangkan kelas lainnya yaitu Petromyzontida

sebagian besar hidup di air tawar. Sebuah fosil myxinid awal, *Myxinikela siroka* (**Gambar 6.8**) telah ditemukan berumur 300 juta tahun dengan bentuk tubuh yang sangat mirip dengan spesies *hagfish* modern dengan sedikit perubahan selama waktu evolusi. Spesimen ini memiliki mata yang berkembang dengan baik. Namun melalui analisa mikroRNA menunjukkan proses degenerasi dari nenek moyangnya yang memiliki struktur anatomis lebih kompleks (Shinohara *et al.*, 2014).



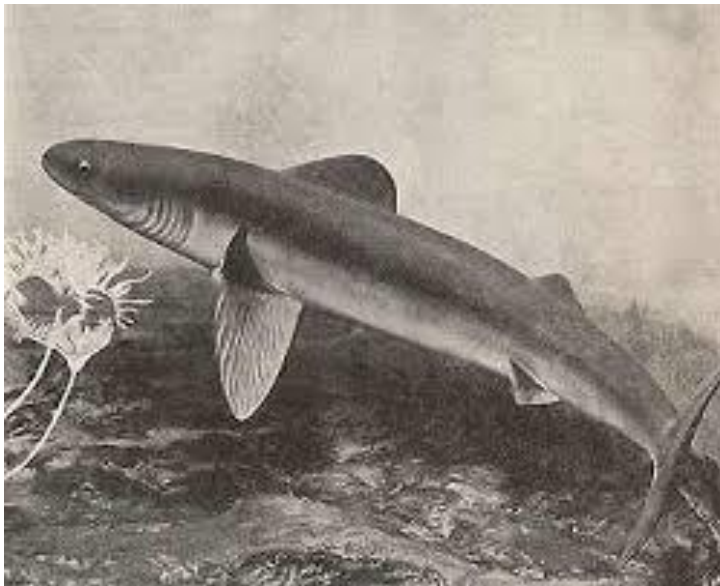
Gambar 6.8. Morfologi Fosil *Myxinikela siroka*
(Sumber: Miyashita, 2020)

6.2.1.2 Chondroicthyes (Ikan bertulang rawan)

Ikan tulang rawan yang mendiami ekosistem laut dalam berasal dari 3 ordo yaitu Chimaeriformes, Selachii, dan Batoidea. Ordo Chimaeriformes terdiri dari 39 spesies dan merupakan satu-satunya ordo yang masih ada sedangkan 12 ordo lainnya telah punah. Tiga famili dari Chimaeriformes masih bertahan hingga sekarang yaitu Callorhynchidae (chimera hidung bajak), Rhinochimaeridae (chimera hidung panjang) dan Chimaeridae (chimera hidung pendek). Keberadaan ordo Chimaeriformis telah ada sejak awal hingga pertengahan jaman jurasic (190-167 milyar tahun lalu) yang hidup di sekitar benua, pulau, gunung laut dan ngarai laut dalam (Sion *et al.*, 2004).

Golongan ikan selachii (sejenis hiu) telah ditemukan sejak periode Devonian (300 juta tahun) yaitu *Cladoselache* (**Gambar 6.9**) yang memiliki

panjang tubuh hingga 2 meter. Selachii memiliki dua subordo yaitu Squalomorphi dan Galeomorphi. Squalomorphi didominasi oleh spesies laut dalam seperti Hexacanthiformes (hiu enam insang), Echinorhiformes (hiu belukar), Squatiniformes (hiu belukar), Squatiniformes (hiu bidadari) dan Pristophoriformes (hiu bergaji). Squalomorphi merupakan hiu laut yang paling banyak dieksplorasi dan paling lama bertahan sejak zaman Trias hingga akhir kepunahan kapur (Simpfendorfer & Kyne, 2009).



Gambar 6.9. Ikan *Cladoselache*
(Sumber: Dean, 1858)

Galeomorphi terdiri dari 250 spesies hiu termasuk hiu yang hidup di permukaan yaitu hiu martil (Heterodontiformes), hiu karpas (Oreotolobiformes), hiu makarel (Lamniformes) dan hiu tanah (Carchariiformes). Kedalaman maksimum yang masih dapat ditoleransi yaitu 2200 m untuk *Apristurus microps* (**Gambar 6.10**), sedangkan rata-rata kedalaman maksimum untuk famili Galeomorphi pada kedalaman 718 m (Tanaka *et al.*, 2013).

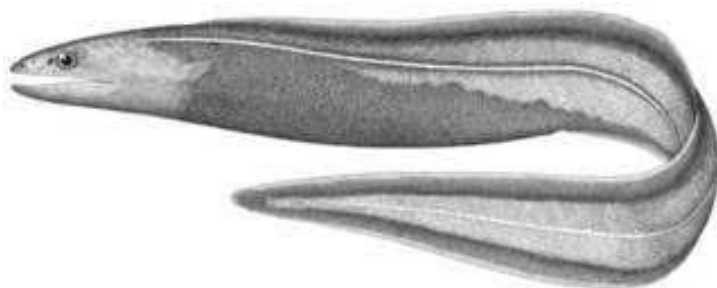


Gambar 6.10 *Apristurus microps*
(Sumber: Ebert *et al.*, 1996)

Ikan batoidea (sejenis ikan pari) diperkirakan muncul sejak 140 juta tahun dan yang hidup di ekosistem laut dalam berasal dari family Rajidae dengan dua subfamily yaitu Rajinae (pari berhidung keras) dan Arhynchobatinae (pari berhidung lunak). Genus *Rajella* (*R. bigelowi*) merupakan ikan yang hidup pada kedalaman tinggi dan hidup sekitar 10 juta tahun (Carrier *et al.*, 2004).

6.2.1.3 Actinopterygii

Sejumlah kecil ikan dari actinopterygii yang masih hidup sampai sekarang seperti ikan *sturgeon*, *paddlefish*, dan *bowfins* yang sekarang berhabitat di air tawar sampai payau. Beberapa jenis actinopterygii yang hidup di ekosistem laut dalam antara lain dari ordo Anguilliformes (sekitar 900 spesies), Synprobranchidae (sekitar 48 spesies) seperti *Histiobranchus bathybius* (**Gambar 6.11**) yang hidup di kedalaman 5440 m, Cyematidae, Saccopharyngidae, Eupharingidae, Monognathidae, Nemichthidae dan Serrivomeridae. Khusus untuk kelompok Anguillidae melakukan pemijahan pada laut dalam dan bermigrasi ke air tawar (Priede & Froese, 2013).



Gambar 6.11 *Histiobranchus bathybius*
(Sumber: Karmovskaya & Merrett, 1998)

Kelompok lain yaitu Alepocephaliformes meliputi Platytroctidae, Bathylaconidae, dan Alepocephalidae memiliki sekitar 100 spesies yang hidup pada laut dalam dengan organ-organ yang sederhana. Kelompok ini diduga telah hidup mulai 220 juta tahun yang lalu dan dianggap sebagai kelompok endemic ekosistem laut dalam (Priede & Froese, 2013).

Ordo Argentiniformes termasuk Opisthoproctidae yang memiliki mata tabung yang menghadap ke atas serta Microstomidae dan Bathylaginae yang merupakan family ikan laut dalam yang bertubuh ramping, sedangkan Stomiatiiformes didominasi oleh ikan-ikan yang mampu menghasilkan cahaya (Nazarkin, 2016). Terdapat juga ordo Ateleopodiformes yang hanya terdiri dari satu family yaitu Ateleopodidae yang dicirikan dengan kepala yang besar serta tubuh yang panjang meruncing dan tumbuh hingga 2 meter (Ho *et al.*, 2021).

Ordo Gadiformes terdiri dari lebih dari 600 spesies yang ditemukan di kedalaman lebih dari 6000 m dan dianggap sebagai ikan kuno yang masih ada. Ikan-ikan dari ordo ini umumnya mendiami lereng benua, bukit dan gunung laut seperti *Micromisistius poutassou* (**Gambar 6.12**) (Kawai *et al.*, 2020). Ordo Chaunacidae yang ditemukan hingga kedalaman 2000 m. Subordo Ogcocephaloidei memiliki satu family yaitu Ogcocephalodea yang memiliki bentuk khas, berjalan di dasar dengan sirip dada yang besar dan ditemukan hingga kedalaman 4000 m. Subordo terbesar adalah Ceratoidei dengan 11 famili dan 160 spesies. Ikan ini memiliki dimorfisme seksual yang sangat mencolok dimana ikan jantan berukuran sangat kecil dan menempel pada ikan betina yang berukuran raksasa (Lavoué *et al.*, 2008).

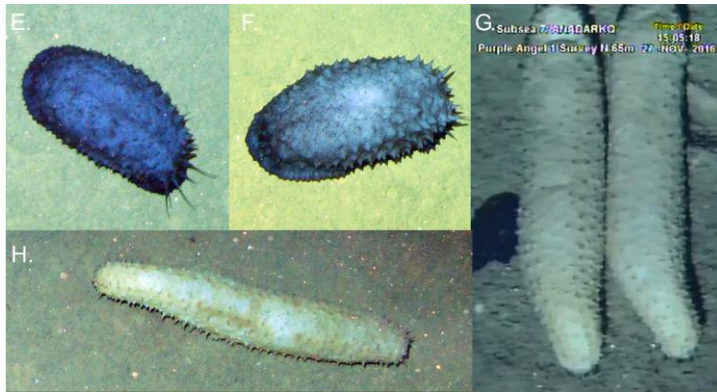


Gambar 6.12 *Micromisistius poutassou*
(Sumber: Bariche & Fricke, 2020)

6.2.2 Hewan Tidak Bertulang Belakang (*Invertebrate*)

Hewan invertebrata yang mendiami ekosistem laut dalam didominasi oleh organisme benthik. Beberapa organisme ditemukan sebagai nekton yaitu cephalopoda, seperti *Nautilus*, gurita, dan cumi-cumi. Selain itu, beberapa kelompok invertebrata laut dalam dibedakan berdasarkan ukurannya yang besar seperti sponge, lili laut, dan anemone laut. Hal ini berpengaruh pada sebaran vertikal serta ketersediaan microhabitat yang cocok untuk organisme tersebut (Taylor & Roterman, 2017).

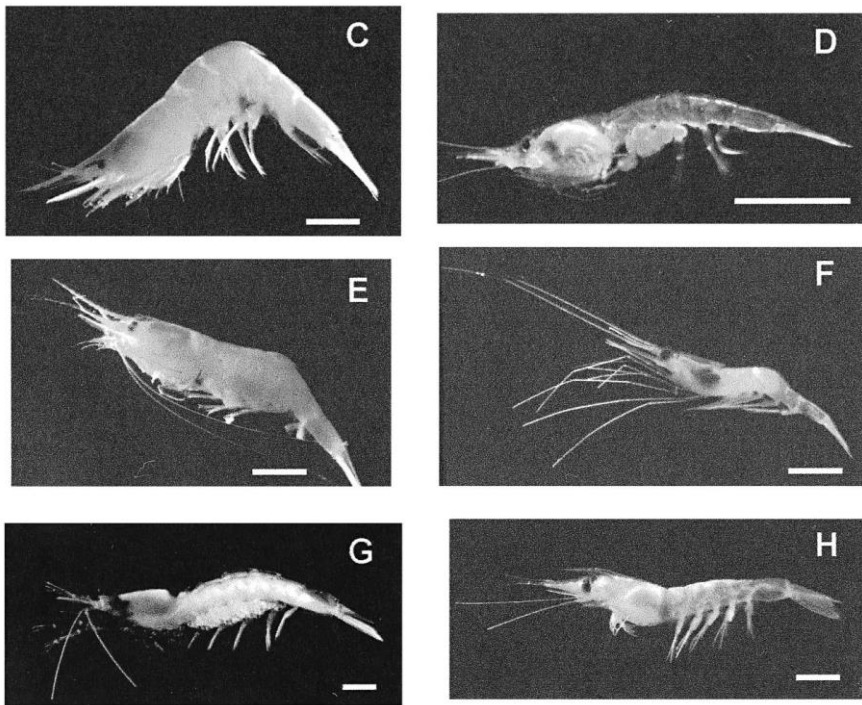
Filum Echinodermata pada habitat laut dalam berada pada zona batial hingga abisal yang berasal dari tiga kelas yaitu Holothuroidea, Echinoidea dan Asteroidea. Spesies dari kelas Holothuroidea yang ditemukan antara lain *Chiridota heheva*, *Benthothuria funebris*, *Paroriza pallens* (**Gambar 6.13**) dan *Pseudostichopus* spp. Anggota dari kelas Holothuroidea sebagian besar merupakan *deposit feeder* yang mengkonsumsi sedimen dan memodifikasi kualitas bahan organik dalam sedimen. Selain itu, spesies ini juga berperan dalam proses pemanfaatan fitodetritus dan mineral melalui proses regenerasi dan respirasi. Oleh karena itu, holothurian digunakan untuk mengevaluasi komposisi komunitas dan aktivitas respirasi yang terjadi pada ekosistem laut dalam (Borrero-Pérez *et al.*, 2020). Spesies Echinoidea yang telah ditemukan yaitu *Cidaris rugosa*, *Phormosoma placenta*, *Gracilechinus gracilis*, *Gracilechinus tylodes*, *Gracilechinus affinis*, dan *Gracilechinus alexandri*. Anggota kelas ini berasosiasi dengan kerang *Bathymodiolus* sp. dan menghasilkan hubungan yang saling menguntungkan (simbiosis mutualisme) (Pawson *et al.*, 2015). Sedangkan untuk kelas Asteroidea didominasi oleh bintang mengular (*ophiurid*) dari genus *Odinella*, *Brisingaster* dan *Novodinia* yang mendominasi wilayah gunung laut dalam dan kawasan hidrotermal. Genus ini dapat hidup sendiri-sendiri maupun berkelompok membentuk koloni hingga 300 individu serta mampu menjangkau partikel makanan yang terbawa oleh arus bawah menggunakan lengannya yang panjang (Zhang *et al.*, 2024).



Gambar 6.13. *Benthothuria funebris* (E-F) dan *Paroriza pallens* (G-H)
(Sumber: Borrero-Pérez *et al.*, 2020)

Filum Moluska merupakan komponen penting dari makrobentos pada gunung laut pada kedalaman lebih dari 400 m. Anggota filum ini dapat hidup terpendam dalam sedimen (dari kelas Bivalvia) maupun di permukaan tanah (dari kelas Gastropoda). Sebagai contoh genus *Bentharca* dan *Dimya* hidup menempel pada substrat yang keras seperti bebatuan serta genus *Xylophaga* yang memerlukan substrat lunak untuk menempel seperti lumpur. Selain itu, cangkang moluska dapat digunakan untuk menelusuri tahap perkembangan awal, sehingga dapat digunakan untuk memahami mekanisme penyebarannya (Janssen & Taviani, 2015).

Krustasea merupakan salah satu hewan yang mengkonsumsi bahan tersuspensi (*filter feeder*) dan bisa hidup di substrat berpasir dan berlumpur. Krustasea juga merupakan kelompok fauna makrobentik yang penting dalam ekosistem laut dalam karena dapat mengatur distribusi sedimen, merubah karakteristik sedimen, mengubah komposisi mikroflora sedimen, mempengaruhi penambahan air dan bahan organik dalam sedimen serta berperan dalam siklus nutrisi dan aliran energi. Beberapa spesies krustasea yang ditemukan pada kedalaman sampai 1000 m (**Gambar 6.14**) antara lain *Acanthephyra purpurea*, *Funchalia villosa*, *Janicella spinicauda*, *Meganycitiphanes norvegica*, *Nematobrachion sexspinosus*, *Nematoscelis megalops*, *Pasiphaea multidentata*, *Plesionika rossignoli*, *Sergestes arcticus*, dan *Stylocheiron maximum* (Frank, 2003).



Gambar 6.14. Krustasea laut dalam

AcanthePHYra purpurea (C); *Janicella spinicauda* (D); *Systellaspis debilis* (E);
Plesionika rossignoli (F); *Pasiphaea multidentate* (G); *Funchalia villosa* (H)
 (Sumber: Frank, 2003)

6.3 Adaptasi Fauna Laut Dalam

Kondisi lingkungan laut dalam yang dicirikan dengan tekanan yang tinggi, tidak adanya cahaya, rendahnya suhu perairan, minimnya nutrisi serta kadar oksigen yang terbatas menyebabkan organisme yang hidup di dalamnya mengembangkan strategi adaptasi untuk mempertahankan hidupnya. Sebagai contoh dengan cara meningkatkan kepekaan organ tertentu dan mengurangi fungsi organ yang tidak digunakan atau dengan mempertahankan kemampuan untuk menghadapi kondisi lingkungan yang memburuk (Cocker, 1978).

6.3.1 Tekanan

Tekanan pada lingkungan laut dalam berada pada kisaran 100-200 atm pada kedalaman berkisar 1000-2000 m, dimana angka tersebut akan

meningkat seiring dengan semakin dalam dalam lautan tersebut. Tingginya tekanan lingkungan luar menyebabkan terjadinya modifikasi struktur dinding sel agar tidak pecah. Beberapa spesies ikan laut dalam memiliki proporsi asam lemak tak jenuh yang lebih besar pada sel hati untuk mempertahankan tekanan turgor sel (Cossins & Macdonald, 1986). Spesies ikan lain seperti *Gadus morhua* dan *Mora moro* beradaptasi dengan tekanan air yang tinggi dengan jalan memperlambat aksi pada serabut saraf sehingga dapat mengurangi fluiditas membran sel (Harper *et al.*, 1987).

Selain itu, pengaturan osmoregulasi melalui regulasi Na^+/K^+ -ATPase dilakukan untuk melindungi fungsi enzim dalam sel. Mekanisme lain yang juga dilakukan oleh ikan laut dalam dalam beradaptasi dengan tekanan yang tinggi yaitu dengan merubah komposisi membran fosfolipid dengan memanfaatkan aktin otot, Laktat dehidrogenase (LDH), malat dehidrogenase (MDH) dan Gliseraldehid-3-fosfat dehidrogenase (GAPDH) serta dengan mengakumulasi tri-metil amine oksida (TMAO) untuk mempertahankan tekanan osmosis sel (Yancey & Siebenaller, 2015).

6.3.2 Bioluminensi

Bioluminensi merupakan kemampuan ikan laut dalam untuk menghasilkan cahaya. Terdapat sekitar 33 famili ikan yang memiliki kemampuan ini, antara lain dari genus *Chlorophthalmus* yang dapat memendarkan cahaya dari bagian anal dan *Benthalbella* yang dapat mengeluarkan cahaya dari bagian ventral. Sedangkan dari golongan Agnatha, tidak ada yang mampu memendarkan cahaya dan hanya dua family dari hiu yang memiliki kemampuan ini (Haddock *et al.*, 2010).

Bioluminensi pada ikan dapat berasal dari bakteri yang bersimbiosis dengan ikan atau pendaran dari sel cahaya (fotofor). Beberapa genus bakteri seperti *Vibrio* dan *Photobacterium* sering bersimbiosis dengan ikan untuk membantu menguraikan bahan organik. Sedangkan pada ikan yang memiliki sel fotofor (**Gambar 6.15**) mampu menghasilkan cahaya dari molekul luciferin yaitu coelenterazine dan vargula yang apabila dioksidasi dengan enzim luciferase akan menciptakan molekul oxyluciferin dan melepaskan kelebihan energi sebagai foton (Davis *et al.*, 2014).



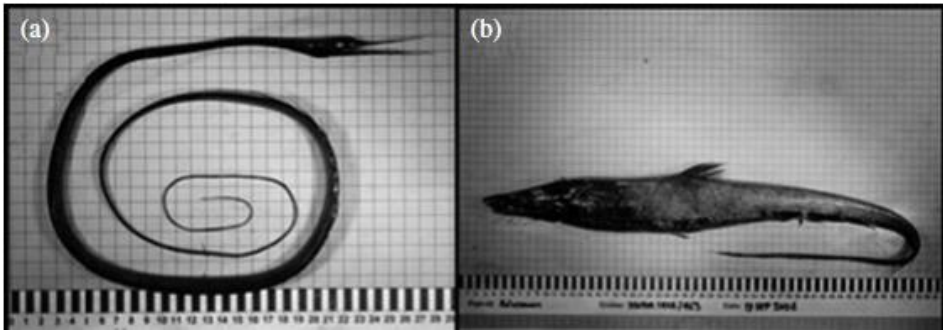
Gambar 6.15. Bioluminensi pada Ikan
(Sumber: Martin & Davis, 2020)

Kemampuan bioluminensi pada ikan laut dalam memiliki banyak fungsi antara lain untuk mengalihkan perhatian mangsa dalam bentuk kilatan cahaya, melarikan diri dari predator dan berkamuflase. Selain itu, kemampuan ini diduga juga berperan dalam komunikasi intraspesifik untuk tujuan berkoloni atau melakukan perkawinan (Young, 1983).

6.3.3 Ukuran dan Bentuk tubuh

Ukuran tubuh organisme laut dalam bervariasi mulai dari yang kecil hingga besar/raksasa (*gigantisme*). Penurunan ukuran tubuh ini berhubungan dengan adaptasi terhadap ketersediaan makanan yang rendah sehingga organisme akan mengurangi kebutuhan makannya. Sedangkan fenomena sebaliknya dimana organisme menjadi lebih besar disebabkan karena adanya hukum Heinke yang menyebutkan bahwa ukuran rata-rata individu akan meningkat seiring dengan kedalaman. Selain itu, peningkatan ukuran tubuh ini juga berkorelasi dengan suksesi kedalaman dan pola siklus hidup (Moranta *et al.*, 2004).

Bentuk tubuh ikan laut dalam umumnya memiliki bentuk yang lebih ramping dan memanjang (**Gambar 6.16**) seperti pada famili *Macrouridae*, *Halosaurus*, *Chimaera*, dan *Anguilliformes*. Beberapa keuntungan yang didapatkan oleh ikan karena bentuk tubuh ramping memanjang yaitu memudahkan pergerakan renang, mengurangi gesekan dengan air dan memiliki garis lateral yang lebih panjang untuk menangkap rangsangan yang lebih banyak (Friedman *et al.*, 2020).



Gambar 6.16. Bentuk tubuh ikan laut dalam yang memanjang
Nemichthyus scolopaceus (a); *Halosaurus machrochir* (b)
 (Sumber: Neat & Campbell, 2013)

6.3.4 Penglihatan

Pada ikan laut dalam, kondisi lingkungan yang gelap akan memodifikasi mata yang dimilikinya. Ikan *Stylephorus chordatus* memiliki mata yang menghadap ke depan dan berbentuk tabung (bertangkai) yang memungkinkannya untuk menemukan dan menangkap mangsanya. *Macropinna microstoma* memiliki mata barel, yang dapat berputar sebagai upaya mewaspadai pemangsa. Beberapa ikan lain memiliki ukuran mata yang lebih besar untuk menangkap cahaya lebih banyak (**Gambar 6.17**) (Warrant *et al.*, 2008).

Bagian retina mata ikan laut dalam termodifikasi memiliki sensitivitas yang maksimal dan tidak memiliki sel kerucut. Genus ikan *Bathysauroides* dan *Chlorophthalmus* memiliki sel batang pada retina matanya yang lebih panjang dengan jumlah yang mendominasi. Selain itu, pada mata ikan laut dalam juga memiliki kepadatan sel ganglion retina mata yang seragam seperti pada ikan *Serrivomer beani* (Serrivomeridae), *Scopelogadus beanii* (Melamphaidae), *Diaphus raphinesquii*, *Myctophum punctatum*, *Nannobrachium atrum* (Myctophidae) dan *Melanonus zugmayeri* (Melanonidae) (Douglas *et al.*, 1998).

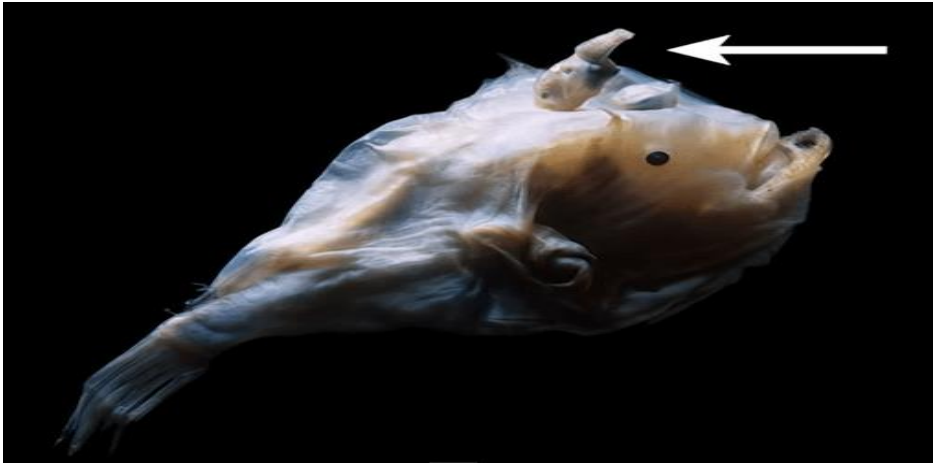


Gambar 6.17. Perbedaan Ukuran Mata Ikan Laut Dalam *Myctophum brachygnathum*) (A) dan Ikan Pelagis *Nannobranchium phyllisae*) (B)
(Sumber: de Busserolles *et al.*, 2013)

6.3.5 Reproduksi

Sebagian besar ikan laut dalam bersifat dioecius (berumah dua) dengan ukuran jantan yang lebih kecil dibandingkan betina. Golongan ikan Ceratoid (famili Linophrymidae) ikan jantan bersifat parasit pada ikan betina yang hidup menempel secara posteroventrikular menggunakan dentikel yang dapat mencengkeram betina dengan kuat (**Gambar 6.18**). Ukuran ikan jantan hanya 4,8 mm, jauh lebih kecil dibandingkan ikan betina yang berukuran 15,5 mm (Pietsch, 2005).

Ikan laut dalam lainnya dari golongan Iniomi bersifat hermafodit untuk mencegah kesulitan dalam mencari pasangan saat musim memijah. Sedangkan beberapa ikan brotulid mengalami proses ovulasi yang terus-menerus sehingga berkemungkinan dapat melakukan pemijahan kapanpun saat bertemu ikan jantan. Ikan golongan macrourids menempatkan telurnya jauh dari lokasi pemijahannya (sekitar 40-65 mil) untuk menghindari predator dan akan menetas dalam kurun waktu kurang dari 2 minggu (Cocker, 1978).



Gambar 6.18 Ikan Ceratioid Jantan (Tanda Panah) Bersifat Parasit pada Ikan Betina
(Sumber: Vieira *et al.*, 2013)

Bab 7

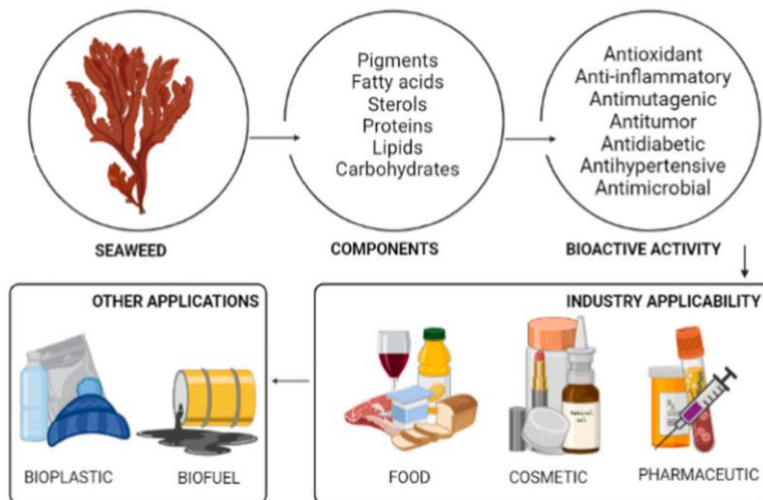
PEMANFAATAN SUMBER DAYA HAYATI LAUT

Lautan menyelimuti 71% permukaan planet bumi dan memiliki biodiversitas dengan beragam sumber daya hayati—kombinasi hewan laut, tumbuhan laut, dan laut mikroorganisme yang mempunyai nilai ekonomis bagi manusia. Beberapa diantaranya dapat digunakan langsung sebagai pangan, dan lainnya dapat dikembangkan menjadi pangan sehat bernilai tinggi, obat-obatan kelautan, atau materi maju (Li & Li, 2023). Sumber daya hayati laut meliputi berbagai makanan laut, hasil samping pengolahan makanan laut, dan sumber daya mikroba laut yang tidak dapat dimakan. Makanan laut, seperti ikan laut, udang laut, kepiting laut, kerang, tiram, cumi-cumi, ubur-ubur, teripang, bulu babi, rumput laut, wakame, sargassum, dan rumput laut, dll., mengandung beberapa protein, enzim, peptida, polisakarida, asam lemak tak jenuh ganda rantai panjang omega-3, astaxanthin, taurin, saponin, vitamin, dll. (Ozogul *et al.*, 2021). Enzim yang berasal dari laut seperti kitinase, kitosanase, alginat lyase, agarase, karagenase, α -amilase, xilanase, lipase, protease, dan kolagenase dapat secara spesifik mengenali dan mendegradasi substrat menjadi oligosakarida, monosakarida, peptida, dengan berat molekul rendah sehingga dapat pula diterapkan pada makanan, kesehatan, kosmetik, pertanian, dan industri farmasi (Ghattavi & Homaei, 2023). Saat ini pemahaman, pengembangan, dan pemanfaatan sumber daya hayati laut masih sangat terbatas dan menghadapi banyak tantangan. Oleh sebab itu dengan kemajuan penelitian ilmiah dan pengembangan bioteknologi baru, pemanfaatan sumber daya hayati laut yang bernilai tinggi akan semakin bermanfaat bagi kesehatan dan kehidupan manusia di masa depan. Pada bab ini akan membahas berbagai sumberdaya hayati laut dan pemanfaatanya dalam berbagai

bidang seperti pangan (nutraseutika), sediaan obat (farmaseutika), ediaan kosmetik (kosmetika), lingkungan, dan lain-lain.

7.1 Rumput Laut

Rumput laut merupakan organisme yang sangat beragam, sangat berbeda dalam bentuk, ukuran, dan siklus hidup. Rumput laut dibagi menjadi tiga kelompok: merah (Rhodophyta), hijau (Chlorophyta), dan coklat (Ochrophyta, Phaeophyceae). Beberapa beradaptasi di kawasan di pesisir pantai, sementara yang lain tumbuh di kawasan terbuka yaitu daerah pasang surut dan gelombang yang kuat (Wernberg *et al.*, 2011). Rumput laut merupakan organisme yang kaya akan senyawa bioaktif seperti protein, mineral, vitamin, serat, esensial asam amino, pigmen, dan asam lemak, yang memberikan sifat antihipertensi, antidiabetes, antioksidan, anti-inflamasi, antitumoral, antivirus, dan antimikroba yang luar biasa. Rumput laut berpotensi berkontribusi terhadap keamanan global di masa depan dalam pangan fungsional dan nutraceuticals dan dapat menjadi senyawa penting dalam industri farmasi dan bioteknologi dalam pengembangan obat (Velázquez *et al.*, 2023). Aplikasi kandungan rumput laut dan bioaktivitasnya dapat dilihat pada **Gambar 7.1**.



Gambar 7.1 Aplikasi Kandungan Rumput Laut dan Bioaktivitasnya
(Sumber : Echave *et al.*, 2022)

Rumput laut dikonsumsi di wilayah pesisir dan merupakan bagian dari makanan sehari-hari di banyak negara. Saat ini gaya hidup sehat dan kesadaran makan makanan bergizi telah meningkat sehingga rumput sebagai alternatif makanan sehat dari laut yang banyak dicari konsumen (Ahteenmaki-Uutela *et al.*, 2021). Sekitar 600 spesies rumput laut digunakan di seluruh dunia sebagai makanan, dan yang paling banyak dikonsumsi adalah rumput coklat, disusul merah dan rumput laut rumput laut hijau. Bahkan Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) menyatakan di Eropa ditemukan lebih dari 200 spesies makroalga memiliki nilai gizi dan komersial (Leandro *et al.*, 2020).

Gaya konsumsi baru dan komitmen untuk menciptakan dan makanan dan rasa yang inovatif mendukung pengenalan rumput laut dan turunannya dalam industri makanan. Penambahan rumput laut pada bahan pangan dapat meningkatkan karakteristik nutrisinya (Mouritsen *et al.*, 2013). Selain itu, ada tren baru yang fokus pada pemanfaatan rumput laut untuk menghasilkan pangan berbasis protein, terutama sebagai pengganti sumber protein nabati lainnya. Seiring dengan permintaan produksi pangan fungsional berbahan dasar rumput laut dalam skala industri diprediksi tumbuh secara eksponensial dalam beberapa dekade mendatang (Raja *et al.*, 2022). Banyak produk berbahan dasar rumput laut, sangat penting secara ekonomi dan secara gastronomi, dan dimasukkan dalam makanan sehari-hari kita secara tidak langsung, seperti agar, alginat, karagenan, atau pigmen (Jayakody *et al.*, 2022).

7.1.1 Agar

Sekitar 80% agar-agar digunakan dalam industri makanan karena memanfaatkan kemampuannya dalam membentuk gel. Agar-agar banyak tersedia dalam berbagai bentuk: bubuk, batangan, serpihan dll. Agar larut dalam air panas dan apabila dingin membentuk gel. Selain itu, agar-agar juga digunakan sebagai penstabil dan pengental, karena sifat pembentuk gelnya tinggi suhu (DeAngelo *et al.*, 2023). Kualitas agar-agar terutama bergantung pada sifat kimia yang berkaitan dengan faktor lingkungan dan siklus hidup. Agar-agar berkualitas rendah biasanya digunakan dalam produk makanan seperti bahan tambahan, kertas, tekstil, dan produk perekat di industri lainnya. Sebaliknya, agar-agar berkualitas tinggi digunakan dalam industri farmasi atau bioteknologi

(Kothalawala *et al.*, 2018). Agar yang paling sering digunakan untuk ekstraksi adalah Rhodophyta yaitu Gracilaria dan Gelidium, terutama dari Gelidium corneum, karena tingginya kualitas dan kegunaan spesifik (Jayakody *et al.*, 2023).

7.1.2 Alginat

Alginat merupakan polimer yang terbentuk dari asam mannuronat dan asam guluronate. Alginat merupakan hidrogel tidak beracun dengan sifat industri yang sangat baik. Alginat berkualitas tinggi memberikan kekuatan pembentuk gel dan pengentalan yang kuat (Kothalawala *et al.*, 2018). Dalam industri makanan, biasanya ditemukan dalam bentuk bubuk. Fungsi alginat dalam produk pangan adalah meningkatkan viskositas saus atau krim, memperbaiki tekstur yogurt, mengurangi sedimentasi *pulp* dalam minuman buah, dan mendukung pencampuran komponen dalam emulsi. Selain sebagai pengental, bahan ini juga digunakan sebagai bahan penstabil (misalnya es krim), sebagai bahan pembentuk gel (misalnya, buah zaitun isi), dan sebagai bahan konservatif (misalnya, makanan beku di mana oksidasi dicegah). Kekuatan gel ini bergantung pada keberadaan ion kalsium, dan tidak seperti gel lainnya, alginat tidak meleleh saat dipanaskan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa alginat menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan memiliki aktivitas antitumor dan antibakteri, sehingga dapat digunakan sebagai bahan aktif dalam obat (Mantri *et al.*, 2022). Selain itu, kosmetik dan industri tekstil merupakan konsumen utama alginat dalam pembuatan pewarna, pasta gigi, dan sampo (Abdelbasset *et al.*, 2022). Alginat ditemukan pada rumput laut sebesar $\pm 40\%$, tergantung pada spesies rumput laut, namun Jumlah dan komposisi alginat bergantung pada spesies, habitat, musim, dan luas thallus. Ada banyak spesies yang mempunyai potensi tinggi untuk dijadikan alginat sebagai bahan pangan atau produk turunannya, namun yang utama adalah alginat produsen milik Ochrophyta (Wells *et al.*, 2017), Laminaria, Ascophyllum, dan Lessonia (Jayakody *et al.*, 2022).

7.1.3 Karagenan

Karagenan adalah polisakarida sulfat yang tidak dapat diasimilasikan saluran pencernaan manusia dan diperoleh terutama dari

rumput laut merah. Karagenan adalah salah satu bahan pemberi tekstur utama dalam industri makanan setelah gelatin (hewani) dan pati (nabati). Ada beberapa jenis karagenan yang masing-masing mempunyai sifat yang berbeda-beda, tergantung pada spesies dan proses ekstraksi: kappa, iota, dan lambda (Welw *et al.*, 2017). Karagenan memiliki kegunaan yang berbeda dalam industri makanan karena kandungannya yang tinggi kapasitas untuk mengikat protein, yang menjadikannya ideal sebagai penstabil. Penggunaan zat penstabil pada produk susu dan es krim mencegah pembentukan es, yang biasanya dihasilkan. Milkshake coklat juga mengandung komponen ini, yang memungkinkan partikel kakao tetap masuk penangguhan. Mereka juga digunakan dalam produk daging, seperti olahan hamburger, menyatukan protein dan cairan, dan menghindari penggunaannya bahan tambahan lain yang tidak alami. Karagenan memiliki nilai komersial yang tinggi nilai, dan beberapa aplikasi sedang dikembangkan terkait dengannya, terutama karena mereka dapat membentuk gel termoreversibel dengan aplikasi di dalamnya kosmetik (Shafie *et al.*, 2022), farmasi (misalnya, obat-obatan, rekayasa jaringan, antivirus, dan kapsul pil), dan industri kimia (tekstil, kertas) (Salehi *et al.*, 2019). Yang utama penghasil karagenan termasuk dalam genera *Chondrus*, *Kappaphycus*, dan *Eucheuma*.

7.1.4 Fucoxanthin

Fucoxanthin adalah karotenoid xantofil yang dihidrolisis menjadi fucoxanthinol di saluran pencernaan dan selanjutnya diubah di hati. Fucoxanthin memiliki struktur kimia unik yang memberikan manfaat dan efek pada kesehatan manusia. Beberapa institusi telah mengidentifikasi fucoxanthin sebagai faktor utama dalam pola makan sehat masyarakat Jepang (Kanamoto *et al.*, 2021). Pigmen dan metabolit fucoxanthin memiliki efek anti-inflamasi, anti-kanker, antiobesitas, anti-diabetes, dan hepatoprotektif (Bae *et al.*, 2020) dan sebagai suplemen. Fucoxanthin banyak terdapat pada rumput laut coklat dari genera *Undaria*, *Laminaria*, *Sargassum*, dan *Cystoseira* dan pada banyak spesies mikroalga (Pereira *et al.*, 2021).

7.1.5 Budidaya

Secara global, 96% produksi rumput laut atau alga berasal dari budidaya perikanan (Alisha *et al.*, 2019). Industri rumput laut telah banyak dilakukan di berbagai negara di dunia tetapi masih didominasi oleh budidaya perikanan di wilayah Asia (Tabel 7.1).

Tabel 7.1 Sebaran (%) produksi budidaya rumput laut

(%)	2010	2020
Africa	0,69	0,30
America	0,06	0,07
Asia	99,18	99,54
Europe	0,01	0,06
Oceania	0,06	0,03

(Sumber: FAO, 2022)

Produksi budidaya perikanan global pada tahun 2020 mencapai rekor 122 juta ton, dengan 35,1 juta ton berupa rumput laut (alga). Di antara makroalga yang paling banyak dibudidayakan (Tabel 7.2) adalah genera *Porphyra* (nori), *Eucheuma*, *Kappaphycus*, dan *Gracilaria* untuk rumput laut merah, *S. japonica* (kombu) dan *U. pinnatifida* (wakame) untuk rumput laut coklat, dan *Ulva*, *Caulerpa*, *Codium*, dan *Enteromorpha* untuk rumput laut hijau (ahteenmaki-Uutela *et al.*, 2021). Keberhasilan budidaya makroalga bergantung pada pengetahuan yang baik tentang spesies yang akan dibudidaya, meliputi aspek siklus biologis, reproduksi, fisiologi, dan ekologi (Cherry *et al.*, 2019).

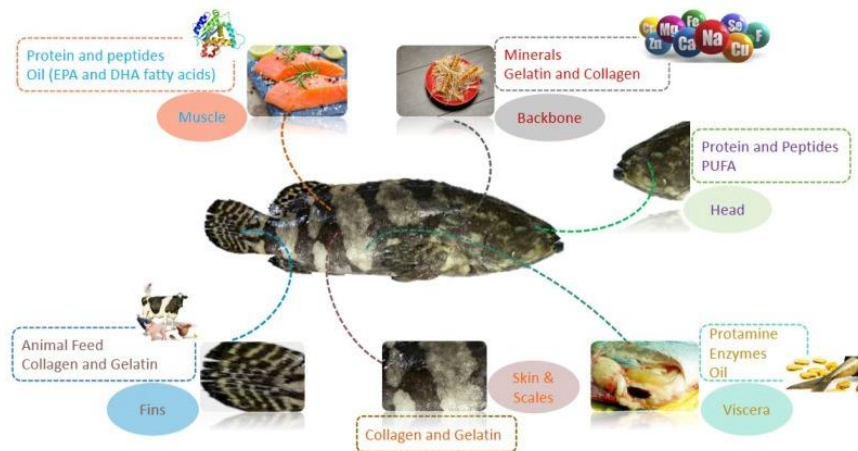
Tabel 7.2. Budidaya rumput laut dan perkiraan produksi (ribu ton, FW)

Jenis rumput laut	2005	2010	2015	2020
<i>Saccharina japonica</i>	5800	6525	10313	12470
<i>Eucheuma</i> spp.	987	3481	10190	8130
<i>Gracilaria</i> spp.	933	1691	3881	5180
<i>Undaria pinnatifida</i>	2440	1537	2297	2810
<i>Porphyra</i> spp.	703	1072	1159	2220
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	1285	1888	1754	1604
<i>Sargassum fusiforme</i>	115	97	209	292

(Sumber: FAO, 2022)

7.2 Ikan/Seafood

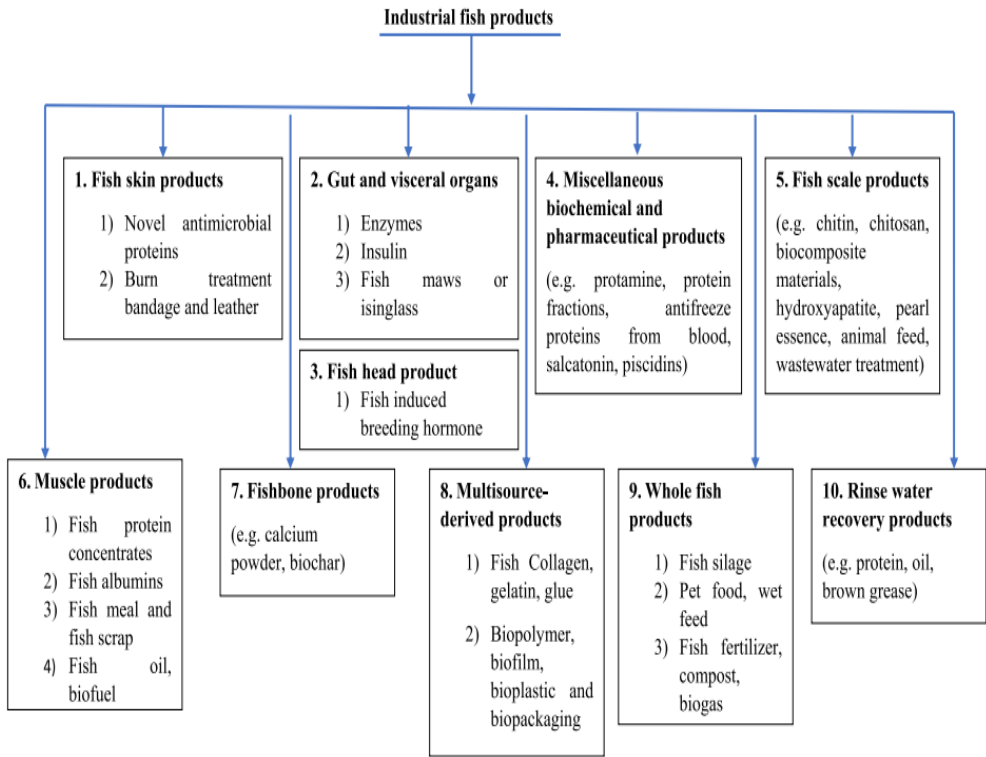
Sejak zaman dahulu ikan atau seafood selalu dianggap sebagai makanan penting bagi manusia. Ikan dan seafood mempunyai segudang manfaat bagi kesehatan manusia. Misalnya, nutrisi penting yang terkandung dalam makanan laut penting dalam perkembangan otak dan sistem saraf serta antikanker (Elvevoll *et al.*, 2008). Di berbagai negara berkembang, ikan dan seafood telah membantu mengatasi kekurangan pangan, dan menjadi pelengkap pola makan yang sehat dan bergizi. Ikan dan seafood kaya akan kandungan PUFA omega-3 yang tinggi, terutama asam docosahexaenoic (DHA) dan asam eicosapentaenoic (EPA) (Ameen *et al.*, 2020). Nutrisi yang ditemukan pada ikan dan seafood dapat dilihat pada **Gambar 7.2**.



Gambar 7.2. Nutrisi pada Ikan/Seafood
(Sumber: Ali et al., 2022)

Selain dikonsumsi, ikan juga dapat digunakan sebagai bahan baku industri yang menghasilkan berbagai produk. Beberapa contoh produk dari ikan atau seafood yang sudah banyak diteliti antara lain isinglass, kitin, kitosan, mutiara, kulit ikan, hidrolisat protein ikan dan konsentratnya, tepung ikan, minyak ikan, kolagen, gelatin, lem, silase ikan, pakan ikan, dan pupuk. Produk-produk ini memiliki aplikasi penting dalam budidaya perikanan, pertanian, makanan, kosmetik dan industri lainnya. Berbagai produk ikan dan seafood berteknologi tinggi juga telah dikembangkan seperti protein antimikroba baru dari lendir

kulit, enzim, insulin, protamine, protein darah, perban pengobatan luka bakar, albumin, bubuk kalsium tulang ikan, biopolimer, bioplastik, pemulihan air bilasan yang berasal dari industri ikan. Produk-produk ini memiliki banyak manfaat aplikasi dalam industri kimia, biomedis dan farmasi. Data terkait limbah pengolahan ikan diasumsikan bahwa dengan produksi ikan sebesar 178,5 juta ton pada tahun 2018, sebanyak 70 % dibuang sebagai limbah berupa sisik (5 %), sirip dan kulit (1–3%). , jeroan (12–18 %), kepala (9–12 %), tulang (9–15 %) dan sisa otot (15–20%) (Torres *et al.*, 2007). Oleh sebab itu limbah pengolahan ikan dan ikan hasil tangkapan sampingan dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai produk baru seperti enzim, kolagen, insulin, senyawa antimikroba, biopolimer (Mozumder *et al.*, 2022). Berdasarkan bahan bakunya, bagian tubuh ikan yang dapat digunakan menjadi produk dapat diklasifikasikan menjadi 9 kelompok besar yang dapat dilihat pada **Gambar 7.3**.



Gambar 7.3 Klasifikasi Produk Ikan Berdasarkan Bahan Bakunya
(Sumber: Mozumder *et al.*, 2022)

7.2.1 Produk Kulit Ikan

a. Protein antimikroba baru

Lendir berfungsi dalam mekanisme imun yang diproduksi terus menerus dan dikeluarkan untuk menghilangkan mikroba dan parasit yang menempel. Lendir mengandung beberapa protein dan enzim berbeda sehingga bermanfaat sebagai imunoglobulin, protein komplemen, lisozim, protein C-reaktif (CRP), lektin, enzim proteolitik, transferin, alkaline fosfatase (ALP) dan berbagai protein dan peptida antibakteri lainnya (Okella *et al.*, 2021). Penelitian telah melaporkan bahwa protein antimikroba ditemukan dalam lendir ikan menunjukkan efek penghambatan terhadap berbagai bakteri misalnya *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, dan jamur misalnya *Candida albicans*, *Issatchenkia orientalis* (Hellio *et al.*, 2002).

b. Perban Pengobatan Luka Bakar dan Kulit

Perban dari kulit untuk luka bakar dapat dibuat dari limbah kulit ikan nila. Kandungan kolagen mempercepat penyembuhan dan mengurangi nyeri. Dari beberapa penelitian kulit ikan uyang dapat dimanfaatkan antara lain dari kulit ikan hiu, pari, salmon, lele, *cod*, *haddock*, *cusk*, *pollock*, dan ikan mas (Ge *et al.*, 2020).

7.2.2 Organ Usus dan Visceral

a. Enzim

Enzim ikan berbeda dari terestrial dalam hal komposisi asam amino, berat molekul, pH optimal, suhu, stabilitas, dan karakteristik kinetik dikarenakan kemampuan adaptasi ikan di berbagai lingkungan ekstrim (lingkungan ekstrim kelebihan salinitas, tekanan hidrostatik, air yang sangat dingin atau panas, kelangkaan nutrisi terbatas). Langkah-langkah ekstraksi dasar untuk mendapatkan enzim protease dari jeroan ikan adalah kominusi, homogenisasi, sentrifugasi, pemisahan presipitasi dan supernatan, saturasi, pelarutan dan dialisis. Protease yang diekstraksi akan bersifat asam atau basa tergantung pada variasi langkah metode ekstraksi (Vannabun *et al.*, 2014). Enzim dari ikan dan kerang digunakan untuk obat-obatan, kosmetik, proses pembuatan makanan, dan penelitian dasar misalnya biosensor dan genkloning (Borges *et al.*, 2023).

b. Insulin

Insulin yang berasal dari ikan ditemukan lebih lemah dibandingkan insulin sapi/babi karena perbedaan imunologi. Namun dokter tidak melaporkan adanya perbedaan signifikan fungsi insulin yang berasal dari ikan. Jumlah insulin yang ditemukan pada beberapa ikan telah disajikan pada (Tabel 7.3).

Tabel 7.3. Jumlah insulin ditemukan pada beberapa ikan

Ikan	Berat sel darah Stannius/ikan (g)	Unit insulin/g sel darah	Unit insulin/ikan
Mackerel (<i>Scomber tapinocephalus</i>)	0,005	~76	~0.4
Tuna (<i>Neothunnus macropterus</i>)	-	160	-
Albacore (<i>Thunnus alalunga</i>)	0,087	160	14
Bonito (<i>Katsuwonus vagans</i>)	0,074	137	10
Yellow tail (<i>Seriola quinqueradiata</i>)	0,062	147	9

(Sumber: Borges *et al.*, 2023)

c. Gelembung Renang

Kantung udara ikan yang telah dibersihkan dan dikeringkan dikenal dengan nama isinglass. Kegunaan utama isinglass meliputi penjernihan minuman, bahan dasar perekat, dan bahan baku kolagen.

7.2.3 Hormon Perkembangbiakan yang Diinduksi Ikan

Ekstrak kelenjar hipofisis (PG) umumnya digunakan sebagai bahan penginduksi hipofisasi. PG berada di bawah otak ikan disimpan dalam vial berisi aseton. Setelah mengumpulkan PG dalam jumlah yang cukup, aseton lama dikeringkan. PG yang dikeringkan dengan aseton dapat disimpan selama bertahun-tahun (5–8 tahun) di daerah subtropis dan tropis. Botol yang tersegel harus disimpan dalam kantong plastik

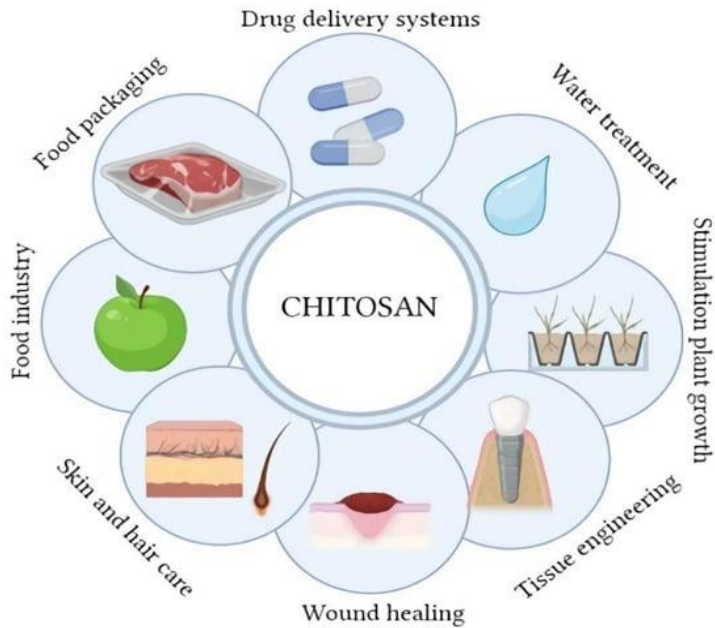
dengan silika gel atau dalam desikator. PG juga dapat diawetkan dalam alkohol absolut atau dengan pembekuan instan.

7.2.4 Berbagai Produk Biokimia dan Farmasi

Asam nukleat dan nukleosida, protamin, streptogenin, glutathione, kortison, garam empedu, protein darah, salcatonin, dan antibeku protein memiliki kepentingan ilmiah dan teknis. Meskipun produk-produk ini memiliki potensi manfaat, namun belum ada satu pun produk yang diproduksi secara komersial kecuali protamin. Sperma salmon dan herring adalah sumber protamine komersial. Protamin tersedia secara komersial dalam bentuk kristal putih pucat atau bubuk amorf atau larutan berair bening, tidak berwarna dan tidak berbau. Selama persalinan dan operasi jantung, protamin digunakan menetralkan efek antikoagulan heparin. Protamin yang dikombinasikan dengan insulin menurunkan laju penyerapan insulin oleh jaringan, oleh karena itu, secara signifikan memperpanjang efektivitas insulin (Saguer *et al.*, 2006).

7.2.5 Produk Sisik Ikan/Cangkang

Sisik ikan, cangkang kepiting, kulit udang merupakan sumber kitin dan kitosan. Kitin diekstraksi dari sisik ikan melalui dua langkah yaitu deproteinisasi dan demineralisasi. Kitosan diproduksi melalui deasetilasi kitin (Luthfiyana, 2022). Kitin dan kitosan tidak beracun dan murah. Aplikasi kitin dan kitosan meliputi teknologi sel induk, pengiriman obat dan gen, penyembuhan luka, rekayasa jaringan, kosmetik, industri makanan, penghilangan logam berat, antimikroba (Luthfiyana, 2022). Biosorben dibuat dari sisik ikan dapat digunakan untuk menghilangkan polutan obat-obatan, logam berat dan pewarna dari air limbah (Eletta *et al.*, 2019). Beberapa aplikasi kitosan dapat dilihat pada **Gambar 7.4**.



Gambar 7.4 Aplikasi Kitosan
(Sumber: Kulka *et al.*, 2023)

7.2.6 Produk dari Ikan

a. Konsentrat Protein Ikan

Konsentrat protein ikan (FPC) diproses melalui ekstraksi, sentrifugasi, pengeringan dan penggilingan. Ada tiga jenis FPC yaitu Tipe A (tanpa rasa, bau, kadar lemak maksimal 0,75 %), Tipe B (tidak ada batasan rasa, bau), Tipe C (hanya tepung ikan tetapi tidak ada organisme patogen). Protein FPC ketika disuksinilasi menunjukkan kapasitas dan stabilitas emulsi yang lebih besar dibandingkan gelatin. FPC dapat digunakan untuk fortifikasi makanan yang berbeda, misalnya. Biscuit (Mohamed *et al.*, 2014).

b. Albumin

Selain dari otot ikan, albumin dapat diekstraksi dari darah. Dalam darah, sekitar 60% dari total protein plasma adalah albumin. Albumin ikan terdiri dari dua tingkatan yaitu teknis dan mutu pangan serta

farmasi. Albumin *food grade* digunakan dalam bubuk sup, produk roti dan kembang gula, mayones, es krim, custard bubuk, pudding. Albumin ikan dapat digunakan sebagai obat untuk pasien pasca operasi dan *stroke*. *Channa striata*, *Nemipterus japonicus*, *Chanos chanos*, *Rastrelliger kanagurta* dapat digunakan untuk produksi albumin (Aditi & Varsha, 2020).

c. Tepung Ikan

Sekitar 90 % bahan baku tepung ikan berasal dari ikan sarden, ikan teri, *capelin*, dan *menhaden* dan sisanya 10 % berasal dari ikan rucah atau sisa makanan. Tahapan pengolahan tepung ikan adalah pemasakan, pengeringan tekan dan penggilingan. Secara tradisional tepung ikan dan minyak ikan diproduksi secara bersamaan. Sekitar 63 %, 25 % dan 8 % dari total tepung ikan yang diproduksi digunakan sebagai pakan budidaya, pakan babi, dan pakan unggas (Boyd, 2015).

d. Minyak Ikan dan Biofuel

Minyak ikan mengandung asam lemak ω -3 yang bermanfaat bagi kesehatan. Minyak ikan merupakan bahan penting dalam pakan ternak, produk nutraceutical untuk kesehatan sendi tulang, kosmetik, minyak goreng, margarin, pelumas, penyamakan kulit, pelapis industri dan pembuatan sabun. Dengan bantuan katalis (misalnya H_2SO_4 , CH_3ONa) minyak ikan yang dimurnikan dapat ditransesterifikasi untuk menghasilkan biofuel (Yuvaraj *et al.*, 2016). Minyak tubuh ikan diekstraksi dengan cara basah, pengepresan dan ekstraksi pelarut (Maqsood *et al.*, 2012). Limbah pengolahan ikan juga dapat digunakan sebagai bahan baku produksi minyak ikan (Kudre *et al.*, 2019).

7.2.7 Produk Tulang Ikan

Bubuk kalsium ikan dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan kalsium dan meningkatkan kesehatan tulang. Kalsium dapat dieperoleh dari tulang tuna diberi 10% kalsium karbonat dan tulang ikan nila diberi NaOH, kemudian dicuci dengan air, dikeringkan dan dihaluskan.

7.2.8 Produk Turunan Multisumber

Kolagen, gelatin dan lem dapat diekstraksi dari berbagai komponen tubuh yaitu kulit, tulang dan sisik ikan. Demikian pula, biopolimer, produk biofilm, bioplastik dan biopackaging dapat diolah dari lebih dari satu sumber yaitu sisik ikan, kitin, kitosan, kolagen, gelatin dan protein miofibrilar. Jadi, produk kolagen, gelatin, lem, biopolimer, biofilm, bioplastik dan *biopackaging* sudah ada disebut sebagai produk turunan multisumber.

a. Kolagen Ikan, Gelatin, Lem

Tidak seperti kolagen dari kulit babi dan tulang sapi, kolagen ikan bebas dari penyakit mulut dan kuku (FMD), bovine spongiform encephalopathy (BSE) dan tidak atau tidak mempunyai masalah agama dan etika. Kolagen adalah protein multifungsi (porositas tinggi, imunogenisitas rendah, mampu menembus antarmuka bebas lipid). Kolagen menghambat enzim pengubah angiotensin (ACE) dan menunjukkan fungsi anti-inflamasi. Aplikasi utama kolagen adalah sistem penghantaran obat, pengendalian bahan transdermal dan pengiriman gen (Mahboob *et al.*, 2015). Bentuk kolagen yang terhidrolisis adalah gelatin. Gelatin digunakan dalam industri makanan, farmasi, dan film fotografi. Gelatin adalah produk bermutu tinggi, memiliki kekuatan jel yang tinggi, warnanya terang, dan memberikan kejernihan yang cukup larutan, rasanya manis, dan tidak mengandung pengotor berlebihan (Flick *et al.*, 2000), sedangkan lem memiliki kualitas yang lebih rendah, namun dibuat dari sisik dan kulit ikan nila (Chandravanshi *et al.*, 2019).

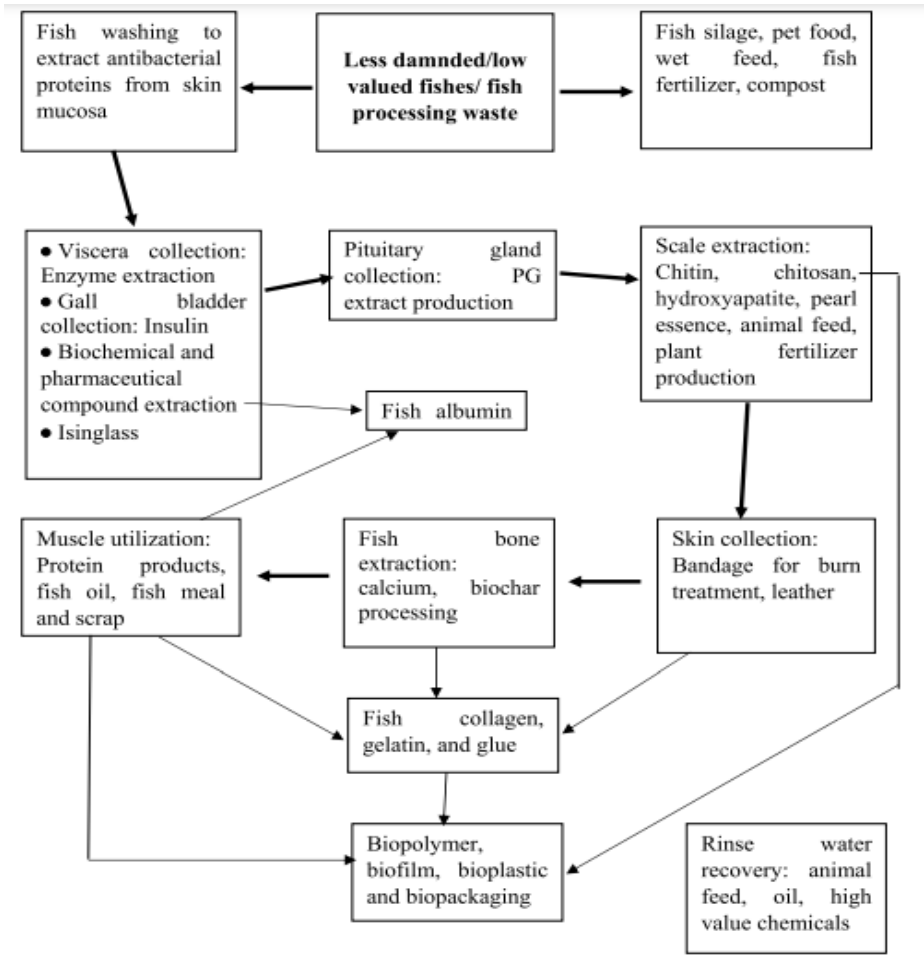
b. Biopolimer, Biofilm, Bioplastik, dan Biopackaging

Sisik ikan, kitin, kitosan, kolagen, gelatin dan protein myofibrillar dapat digunakan untuk memproduksi biopolimer. Karena dampak negatif plastik lingkungan, produksi dan pasar bioplastik meningkat terus berkembang dan semakin terdiversifikasi (Lionetto *et al.*, 2021). Film biopolimer yang dapat dimakan dan pelapis gelatin dapat digunakan untuk biopackaging ikan dan daging karena sifat-sifat berikut, yaitu penerimaan sensori, karakteristik fungsional (kemampuan terurai secara hayati), sifat optik (keburaman dan kecerahan), atribut mekanis (ketegangan, fleksibilitas), ketahanan struktural terhadap air, gas dan

mikroorganisme, biaya dan ketersediaan. Protein myofibrillar ikan dapat digunakan untuk enkapsulasi nutraceutical seperti vitamin, probiotik, peptida bioaktif dan antioksidan (Ramos *et al.*, 2016).

7.2.9 Produk ikan utuh

Dari limbah ikan, berbagai produk dapat diproduksi dan diaplikasikan dalam industri medis, farmasi, kosmetik, makanan, pengemasan, dan pakan ternak. Oleh sebab itu beberapa jalur valorisasi limbah ikan berpotensi untuk dilakukan. Pemanfaatan bagian tubuh ikan dapat dilihat pada **Gambar 7.5**.



Gambar 7.5 Pemanfaatan Bagian Tubuh Ikan
(Sumber: Kulka, 2023)

7.3 Lamun

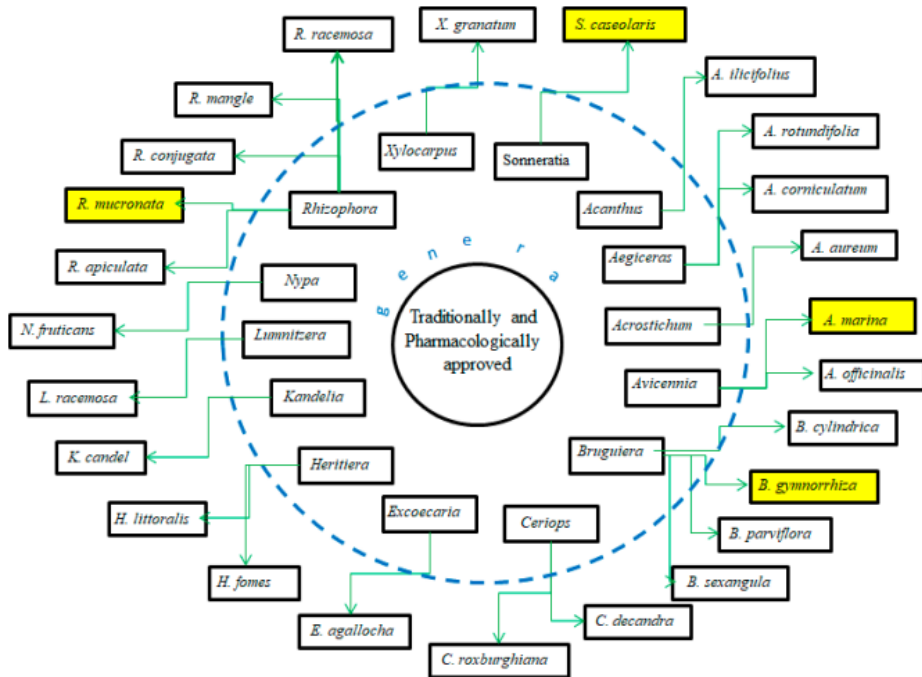
Lamun merupakan ekosistem pesisir yang paling luas penyebarannya di muka bumi, menyediakan keanekaragaman hayati dan fungsi jasa ekologi yang penting, seperti konservasi hayati, perlindungan garis pantai, stabilitas sedimen, pemurnian air dan siklus nutrisi. Padang lamun merupakan tempat berkembang biak organisme dan tempat mencari makan bagi banyak ikan dan invertebrata yang mempunyai nilai ekonomi penting, dan juga merupakan habitat penting bagi spesies yang terancam punah. Terlepas dari manfaat ekologisnya yang penting bagi kehidupan banyak organisme laut, lamun juga digunakan sebagai pengobatan alternatif atau pelengkap untuk mengatasi berbagai gangguan patologis seperti nyeri otot, luka, sakit perut, gangguan pencernaan, mabuk, dan gangguan mental (Zhang *et al.*, 2023).

7.4 Mangrove

Mangrove merupakan tanaman halofilik yang memiliki manfaat ekonomi dan ekologi yang penting. Mangrove dianggap sebagai ekosistem yang paling produktif dan mendasari jaring makanan perikanan. Kawasan mangrove merupakan penghasil kayu/kayu, tempat mencari makan dan bersarang burung, serta komoditas perikanan konsumsi seperti ikan dan kerang (He *et al.*, 2022). Dalam skala global, kawasan mangrove merupakan kontributor alami utama dalam pengelolaan iklim dengan cara yang kompleks, seperti sebagai mekanisme fluks karbon dan skema penyerapannya (Romero *et al.*, 2022).

Mangrove juga dimanfaatkan sebagai bahan pangan lokal yang terkenal dengan khasiatnya seperti buah bakau merupakan sumber yang sangat baik untuk dicantumkan sebagai kandidat pangan baru yang bersifat etnomedisinal (**Gambar 7-.6**). Di dalam buah bakau, kadar metabolit primer seperti karbohidrat, protein, dan lemak dapat diterima untuk sehari-hari. Buah, biji, dan jamur endofit mangrove kaya akan senyawa fenolik, limonoid, dan turunannya sebagai senyawa menghadirkan banyak bioaktivitas seperti antimikroba, antikanker, dan antioksidan. Dalam proses perantaranya, tepung buah bakau berdiri sebagai suplementasi tepung yang sudah ada dengan sifat antidiabetes atau antioksidan. Buah bakau berhasil ditransformasikan menjadi berbagai produk pangan olahan. *Bruguiera gymnorrhiza*, *Rhizophora*

mucronata, *Sonneratia caseolaris*, dan *Avicennia marina* adalah contoh jenis buah mangrove yang dimanfaatkan menjadi makanan tradisional, meskipun lebih banyak spesies menunjukkan etnomedisinal (Bibi *et al.*, 2019).



Gambar 7.6 Jenis Mangrove dan Khasiat Secara Tradisional Farmakologis (Sumber: Budiyanto *et al.*, 2022)

Bab 8

PEMANFAATAN SUMBER DAYA NON-HAYATI LAUT

8.1 Pendahuluan

Lautan merupakan salah satu aset alam yang melimpah, tidak hanya dalam hal kekayaan hayati, tetapi juga sumber daya non hayati yang berlimpah. Sumber daya non hayati laut adalah istilah yang digunakan untuk merujuk kepada semua sumber daya alam yang ditemukan di lingkungan laut, kecuali sumber daya hayati atau biologis. Dalam konteks ini, “non hayati” mengacu pada segala sesuatu yang bukan berasal dari organisme hidup atau tidak memiliki sifat kehidupan. Secara terminologi, sumber daya non hayati laut meliputi beberapa kategori utama, seperti mineral dan tambang, energi, hingga ruang bawah laut (Hwang et al., 2020; Sun et al., 2021; Zhai et al., 2021). Meskipun sering kali terabaikan dalam diskusi tentang pemanfaatan laut, pentingnya sumber daya non hayati laut tidak bisa diabaikan.

Dalam era modern ini, pemanfaatan sumber daya alam menjadi semakin krusial seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi. Namun, seringkali pemanfaatan yang tidak berkelanjutan mengakibatkan kerusakan lingkungan dan kehilangan potensi jangka panjang. Oleh karena itu, adalah suatu keharusan untuk memahami dan memanfaatkan sumber daya non hayati laut secara berkelanjutan, memperhatikan tidak hanya kebutuhan saat ini tetapi juga keberlanjutan masa depan.

Dalam bab ini, kami menyajikan berbagai jenis sumber daya non hayati laut, yang meliputi mineral dan tambang, energi terbarukan, dan

penggunaan ruang bawah laut. Kami juga membahas dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya ini serta upaya pelestarian dan pengelolaan yang sedang dilakukan. Melalui pemahaman yang mendalam tentang sumber daya non hayati laut dan implementasi praktik-praktik berkelanjutan, diharapkan masyarakat secara umumnya dapat mengoptimalkan manfaat dari sumber daya ini tanpa mengorbankan keberlanjutan lingkungan laut yang sangat penting bagi kelangsungan hidup planet ini. Semoga bagian ini membantu memberikan gambaran yang jelas tentang pentingnya sumber daya non hayati laut dan pentingnya pendekatan berkelanjutan dalam memanfaatkannya.

8.2 Jenis Sumber Daya Non-Hayati Laut

8.2.1 Mineral dan Tambang

Mineral bawah laut merujuk pada sumber daya mineral yang terdapat di dasar laut, yang mencakup berbagai jenis mineral seperti terumbu karang kalsium, nodul mangan, dan sulfida hidrotermal. Terumbu karang kalsium adalah struktur geologis yang terbentuk dari akumulasi kalsium karbonat oleh organisme laut, sedangkan nodul mangan adalah bongkahan kecil yang mengandung konsentrasi tinggi mangan serta logam-logam lainnya. Sulfida hidrotermal adalah deposit mineral yang terbentuk di sepanjang celah tektonik di dasar laut sebagai hasil dari interaksi antara air laut yang panas dan cairan hidrotermal yang kaya akan mineral. Eksploitasi mineral bawah laut menjadi topik penelitian dan eksplorasi yang semakin menarik karena potensi ekonomi yang besar. Namun, kegiatan ekstraksi ini juga menimbulkan kekhawatiran atas dampak lingkungan yang dapat ditimbulkannya, termasuk kerusakan habitat laut dan penurunan keanekaragaman hayati (Fontboté et al., 2017; Al-Jaberi et al., 2018; Cronan, 2019).

Selanjutnya, tambang bawah laut merupakan operasi dan fasilitas yang digunakan untuk mengekstraksi sumber daya mineral atau bahan tambang lainnya dari dasar laut (Ahnert & Borowski, 2000). Metode ekstraksi yang digunakan dalam tambang bawah laut mencakup pertambangan terumbu, pertambangan nodul laut, dan pertambangan sulfida hidrotermal. Operasi tambang bawah laut seringkali melibatkan penggunaan teknologi canggih dan kompleks karena kedalaman laut

yang signifikan. Meskipun menawarkan potensi ekonomi yang besar, kegiatan tambang bawah laut juga menimbulkan tantangan teknis, ekonomi, dan lingkungan yang perlu diatasi. Pengelolaan tambang bawah laut memerlukan pendekatan yang berkelanjutan dan terpadu untuk memastikan bahwa sumber daya ini dapat dimanfaatkan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan bagi generasi masa depan.

Mineral bawah laut dan tambang bawah laut seringkali digunakan secara bergantian, tetapi sebenarnya keduanya memiliki perbedaan konseptual yang penting sebagaimana penjelasan di atas. Dengan demikian, meskipun keduanya berhubungan dengan eksploitasi sumber daya di lingkungan bawah laut, mineral bawah laut lebih merupakan fokus pada jenis-jenis mineral yang terdapat di dasar laut, sementara tambang bawah laut merujuk pada operasi dan fasilitas yang digunakan untuk mengekstraksi sumber daya tersebut.



Gambar 8.1. Ilustrasi penambangan bawah laut
(Sumber: Eddy Pump Corporation)

8.2.2 Energi

Lautan menyediakan potensi besar untuk energi terbarukan, seperti energi ombak, arus laut, dan energi panas laut (Cruz et al., 2014). Energi ombak merujuk pada energi yang dihasilkan oleh gelombang laut yang terjadi akibat angin yang berhembus di atas permukaan laut. Teknologi yang digunakan untuk mengekstraksi energi dari ombak termasuk pemanfaatan pelampung atau alat lain yang bergerak mengikuti gerakan ombak untuk menggerakkan generator listrik. Energi ombak memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan karena gelombang laut merupakan sumber energi yang konsisten dan dapat diandalkan (Nandi, 2023). Selanjutnya, energi pasang surut yang merujuk pada energi yang dihasilkan oleh perbedaan tinggi air laut antara pasang dan surut. Teknologi yang digunakan untuk mengekstraksi energi dari pasang surut termasuk turbin air yang dipasang di aliran air pasang-surut untuk menghasilkan listrik. Energi pasang surut memiliki keunggulan karena merupakan sumber energi yang dapat diprediksi dengan akurat dan memiliki potensi energi yang besar (Ahmad et al., 2022).

Selain itu, terdapat energi panas laut, mengacu pada energi yang dihasilkan oleh perbedaan suhu antara permukaan laut dan lapisan air yang lebih dalam. Teknologi yang digunakan untuk mengekstraksi energi dari panas laut termasuk pembangkit listrik tenaga panas laut (PLTP), yang menggunakan uap air yang dihasilkan dari pemanasan air laut untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik (Putri & Fadliha, 2023). Energi panas laut memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan karena panas laut merupakan sumber energi yang dapat diakses secara luas di seluruh dunia (Etemadi et al., 2011). Pengembangan dan pemanfaatan sumber daya energi terbarukan dari laut memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Pelc & Fujita, 2002). Namun, pemanfaatan energi terbarukan dari laut juga menimbulkan sejumlah tantangan, termasuk teknis, ekonomi, dan lingkungan. Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengekstraksi energi dari laut. Pengembangan teknologi ini terus berlanjut untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi energi terbarukan dari laut (Lubis, 2007).

8.2.3 Ruang Bawah Laut

Ruang bawah laut merupakan domain yang kaya akan potensi dan peluang untuk berbagai kegiatan manusia, juga implementasinya pada penyimpanan gas alam cair, infrastruktur pipa bawah laut, serta fasilitas penelitian dan observasi laut. Ketersediaan ruang bawah laut memberikan solusi inovatif untuk mengeksploitasi sumber daya dan memfasilitasi berbagai kegiatan yang sebelumnya sulit atau tidak mungkin dilakukan di darat atau permukaan laut. Salah satu potensi utama dari ruang bawah laut adalah sebagai tempat penyimpanan gas alam cair (GNL) (Yunianto et al., 2020). Gas alam cair memiliki kepadatan energi yang tinggi dan merupakan sumber energi yang penting dalam bauran energi global. Penyimpanan GNL di ruang bawah laut memiliki beberapa keunggulan, termasuk pengurangan risiko terhadap kecelakaan atau bencana lingkungan, serta membebaskan ruang di darat yang berharga untuk kegunaan lainnya (Zemlyanovskiy et al., 2021).

Selain itu, infrastruktur pipa bawah laut dapat digunakan untuk mentransportasi gas, minyak, atau air bersih antara lokasi yang terpisah, menghubungkan pulau-pulau atau wilayah pantai yang terisolasi dengan jaringan energi atau infrastruktur lainnya (Davis & Brockhurst, 2015). Selain itu, ruang bawah laut juga memiliki potensi besar sebagai lokasi untuk fasilitas penelitian dan observasi laut. Fasilitas ini dapat berupa stasiun penelitian bawah laut yang dilengkapi dengan peralatan ilmiah dan observasi untuk mempelajari ekosistem laut, geologi bawah laut, dan dinamika laut. Observatorium bawah laut juga dapat digunakan untuk memonitor perubahan iklim, aktivitas vulkanik, atau seismik di dasar laut dengan lebih akurat dan mendalam. Penggunaan ruang bawah laut untuk kegiatan penelitian dan observasi memberikan akses yang lebih baik dan kontinu ke lingkungan laut yang tidak dapat diakses dengan mudah dari permukaan laut (Zhang & Deng, 2023).

Perkembangan teknologi eksplorasi yang semakin canggih juga menjadi pendorong utama dalam meningkatnya potensi penggunaan ruang bawah laut. Teknologi seperti kendaraan bawah laut otonom dan sistem sensor yang canggih memungkinkan pengumpulan data yang lebih detail dan akurat tentang lingkungan bawah laut, serta memfasilitasi eksploitasi sumber daya dan infrastruktur bawah laut dengan lebih efisien dan aman. Seiring dengan peningkatan aktivitas

manusia di laut, seperti pengeboran minyak dan gas, pembangunan instalasi angkatan laut, dan pengembangan pariwisata bawah laut, potensi penggunaan ruang bawah laut ini akan terus berkembang dan menjadi lebih beragam (Lin & Yang, 2020; Zhang & Deng, 2023).

Dalam mengoptimalkan penggunaan ruang bawah laut, perlu diperhatikan juga dampak lingkungan dan keberlanjutan (Putra et al., 2023). Penyimpanan GNL, pembangunan infrastruktur pipa bawah laut, dan aktivitas lainnya dapat berdampak pada ekosistem laut dan kehidupan laut. Oleh karena itu, pengelolaan yang berkelanjutan dan pemantauan lingkungan yang ketat diperlukan untuk memastikan bahwa penggunaan ruang bawah laut dilakukan secara bertanggung jawab dan tidak merusak lingkungan (Davis & Brockhurst, 2015; Zemlyanovskiy et al., 2021).

8.3 Dampak Lingkungan dan Upaya Pelestarian

8.3.1 Dampak Eksploitasi Sumber Daya Non Hayati Laut terhadap Lingkungan

Sumber daya laut mengacu pada zat, energi, dan ruang laut yang ada dalam lingkungan laut yang dapat dieksploitasi dan dimanfaatkan oleh manusia, termasuk sumber daya biologis laut, sumber daya air laut, sumber daya mineral dasar laut, energi terbarukan laut, dan sumber daya ruang laut, dll (Shan & Zhao, 2013). Pengelolaan sumber daya laut telah menjadi sangat kompleks karena atribut alamiah dan sosialnya (Putra et al., 2023). Bersamaan dengan perkembangan sosial dan ekonomi serta pertumbuhan populasi, terjadi kekurangan serius dalam sumber daya lahan, terutama energi (Zhong, 2019). Eksploitasi sumber daya non-hayati laut dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap lingkungan laut. Dua dampak utama yang perlu diperhatikan adalah pencemaran dan degradasi habitat serta potensi kerusakan terhadap ekosistem laut.

a) Pencemaran dan Degradasi Habitat

Pencemaran laut adalah hasil dari pelepasan atau masukan bahan kimia, limbah, atau partikel fisik ke perairan laut, yang mengakibatkan perubahan negatif pada lingkungan laut. Pencemaran ini dapat disebabkan oleh berbagai kegiatan manusia, termasuk eksploitasi sumber daya non-hayati seperti pembuangan limbah industri, tumpahan minyak,

atau pembuangan limbah dari kapal. Limbah-limbah ini dapat mengandung senyawa kimia beracun, plastik, logam berat, dan berbagai bahan pencemar lainnya yang berpotensi merusak ekosistem laut dan mempengaruhi organisme hidup di dalamnya. Selain itu, aktivitas seperti pengeboran dan peledakan bawah laut juga dapat menyebabkan degradasi habitat dengan mengganggu struktur fisik dasar laut dan mengganggu kehidupan laut yang ada di sekitarnya. Pengeboran bawah laut, misalnya, dapat mengakibatkan kontaminasi sedimen laut dengan bahan kimia beracun dan mengganggu biota benthik yang hidup di sekitar area pengeboran. Sementara itu, peledakan bawah laut dapat merusak terumbu karang dan ekosistem yang rapuh dengan menciptakan gelombang kejut yang merusak dan mengganggu organisme laut. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang dampak berbagai kegiatan eksploitasi terhadap lingkungan laut sangat penting untuk pengelolaan yang berkelanjutan dan perlindungan ekosistem laut yang rentan. (Cheevaporn & Menasveta, 2023; Krishnakumar et al., 2024).



Gambar 8.2. Pencemaran lingkungan laut
(Sumber: Yayasan Bangun Kecerdasan Bangsa, 2023)

b) Potensi Kerusakan terhadap Ekosistem Laut

Eksplorasi sumber daya non-hayati laut memiliki potensi yang signifikan untuk menyebabkan kerusakan pada ekosistem laut yang sensitif. Contohnya, kegiatan penambangan nodul mangan atau sulfida hidrotermal dapat mengganggu habitat alami organisme laut yang mendiami dasar laut. Penambangan nodul mangan, misalnya, dapat

mengganggu struktur fisik dasar laut dan menghancurkan habitat untuk makhluk hidup yang bergantung pada lingkungan tersebut. Sementara itu, penambangan sulfida hidrotermal dapat mengakibatkan pelepasan limbah dan bahan kimia beracun ke lingkungan laut yang dapat merusak ekosistem dan organisme yang hidup di sekitarnya. Gangguan terhadap ekosistem laut yang sensitif ini dapat memiliki dampak yang luas, termasuk penurunan keanekaragaman hayati di daerah yang terkena dampak, gangguan pada rantai makanan laut, dan kerugian ekologis yang signifikan.

Penurunan keanekaragaman hayati dapat mengakibatkan hilangnya spesies yang penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem, sementara gangguan pada rantai makanan laut dapat mempengaruhi kelangsungan hidup organisme yang bergantung padanya. Akibatnya, kerugian ekologis yang timbul dapat memengaruhi fungsi dan layanan ekosistem laut secara keseluruhan, termasuk penyediaan sumber daya yang vital bagi kehidupan manusia dan organisme laut lainnya. Oleh karena itu, perlindungan ekosistem laut yang sensitif dari kerusakan akibat eksploitasi sumber daya non-hayati laut merupakan prioritas penting dalam upaya menjaga keberlanjutan lingkungan laut global. Langkah-langkah pengelolaan yang berkelanjutan dan pendekatan yang hati-hati dalam pengambilan keputusan diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif pada ekosistem laut yang rentan dan memastikan bahwa pemanfaatan sumber daya laut dilakukan secara bertanggung jawab dan berkelanjutan (Krishnakumar et al., 2024).

8.3.2 Upaya Pelestarian dan Pengelolaan Berkelanjutan

Untuk melindungi dan melestarikan sumber daya non-hayati laut serta mengurangi dampak negatif eksploitasi terhadap lingkungan, berbagai upaya pelestarian dan pengelolaan berkelanjutan telah diimplementasikan.

a) Kebijakan dan Regulasi untuk Melindungi Sumber Daya Non-Hayati Laut

Banyak negara dan lembaga internasional telah mengadopsi kebijakan dan regulasi untuk melindungi sumber daya non-hayati laut dan lingkungan maritim secara keseluruhan. Langkah-langkah ini mencakup pembatasan pembuangan limbah industri ke laut, pengaturan aktivitas eksploitasi di daerah yang rentan, dan pendirian kawasan

konservasi laut yang dilindungi. Contoh konkret dari regulasi ini antara lain adalah Konvensi Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Hukum Laut (UNCLOS) dan Perjanjian Kawasan Laut yang Rapuh di luar Yurisdiksi Nasional (BBNJ). UNCLOS, yang mulai berlaku pada tahun 1994, memberikan kerangka kerja hukum yang komprehensif untuk pengelolaan dan pelestarian sumber daya laut dan lingkungan maritim. UNCLOS menetapkan hak dan kewajiban negara-negara pihak dalam pengelolaan sumber daya laut, termasuk kegiatan eksploitasi, konservasi, dan perlindungan lingkungan laut. Sementara itu, BBNJ adalah perjanjian internasional yang sedang dalam proses negosiasi untuk mengisi celah dalam UNCLOS terkait pengelolaan sumber daya laut di luar yurisdiksi nasional. Tujuan BBNJ adalah untuk melindungi dan melestarikan keragaman hayati laut di luar yurisdiksi nasional dan mengatasi tantangan lingkungan yang unik di wilayah-wilayah tersebut. Regulasi-regulasi ini menjadi instrumen penting dalam upaya global untuk menjaga keberlanjutan lingkungan laut dan memastikan bahwa eksploitasi sumber daya non-hayati laut dilakukan secara bertanggung jawab. Namun, implementasi yang efektif dari regulasi ini membutuhkan kerjasama internasional yang kuat, pemantauan yang cermat, dan penegakan hukum yang konsisten. Hanya dengan upaya bersama dari semua pihak, kita dapat menjaga kesehatan dan keberlanjutan lingkungan laut untuk generasi mendatang (UN, 1982; UN, 2017; UN, 2021).

b) Inovasi Teknologi dalam Mitigasi Dampak Lingkungan

Teknologi memainkan peran penting dalam mitigasi dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya non-hayati laut. Inovasi seperti teknologi penangkapan karbon, sistem pengelolaan limbah yang lebih efisien, dan teknologi pemantauan lingkungan bawah laut dapat membantu mengurangi dampak negatif dan meningkatkan keberlanjutan eksploitasi sumber daya laut. Teknologi penangkapan karbon, misalnya, memungkinkan penangkapan dan penyimpanan karbon dioksida yang dihasilkan dari aktivitas ekstraksi sumber daya atau pembakaran bahan bakar fosil di laut. Dengan demikian, teknologi ini dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Sistem pengelolaan limbah yang lebih efisien juga menjadi kunci dalam upaya mitigasi dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya non-hayati laut. Teknologi-teknologi ini

mencakup pengembangan metode pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan dan peningkatan infrastruktur untuk pengumpulan, pengolahan, dan daur ulang limbah laut. Dengan penerapan sistem pengelolaan limbah yang lebih efisien, dapat mengurangi pencemaran laut dan merawat lingkungan laut yang rentan. Selain itu, teknologi pemantauan lingkungan bawah laut juga menjadi aspek penting dalam mitigasi dampak lingkungan. Teknologi seperti sensor bawah laut dan sistem pemantauan jarak jauh dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan laut secara *real-time*, mendeteksi polusi atau perubahan lingkungan yang berpotensi merusak, dan mengarahkan tindakan mitigasi yang tepat waktu. Melalui kombinasi kebijakan yang kuat, regulasi yang ketat, dan inovasi teknologi, upaya pelestarian dan pengelolaan berkelanjutan dapat membantu memastikan bahwa sumber daya non-hayati laut dapat dimanfaatkan secara bertanggung jawab tanpa merusak lingkungan laut yang rentan (Parmesan & Yohe, 2003; Poloczanska et al., 2013; Cai et al., 2014).

8.4 Masa Depan Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut

8.4.1 Tren dan Perkembangan dalam Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut

Masa depan pemanfaatan sumber daya non-hayati laut menjanjikan berbagai tren dan perkembangan yang menarik, seiring dengan peningkatan aktivitas manusia di laut dan kemajuan teknologi.

a) Tren Pertumbuhan Sektor

Sektor pemanfaatan sumber daya non-hayati laut menghadapi prospek yang cerah dalam beberapa dekade mendatang. Proyeksi pertumbuhan yang optimis didorong oleh permintaan yang terus meningkat akan energi terbarukan, yang semakin diakui sebagai solusi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi global yang terus tumbuh. Energi terbarukan dari laut, seperti energi ombak, energi panas laut, dan energi pasang surut, telah menjadi fokus utama dalam upaya memperluas portofolio energi yang bersih dan ramah lingkungan (Zhang et al., 2019a). Selain itu, minat terhadap eksploitasi mineral bawah laut semakin meningkat, dengan perhatian khusus pada potensi ekonomi yang dimilikinya. Mineral bawah laut seperti nodul mangan, terumbu karang kalsium, dan sulfida hidrotermal menjanjikan nilai ekonomi yang signifikan bagi industri dan investor. Potensi ini mendorong penelitian

dan eksplorasi lebih lanjut dalam upaya untuk memahami lebih dalam tentang lokasi, ketersediaan, dan metode ekstraksi yang efisien (Boschen et al., 2016).

b) Perkembangan Teknologi

Perkembangan teknologi akan terus menjadi pendorong utama dalam masa depan pemanfaatan sumber daya non-hayati laut. Inovasi terus muncul dalam bidang robotika, sensorika, dan teknologi kendaraan bawah laut otonom, membuka peluang baru untuk eksplorasi dan eksploitasi sumber daya di ruang bawah laut yang sebelumnya sulit dijangkau. Misalnya, penggunaan robot pengintai bawah laut yang dilengkapi dengan sensor canggih memungkinkan pengumpulan data yang lebih akurat dan komprehensif tentang kondisi lingkungan laut, serta potensi sumber daya yang ada di dalamnya (Sahoo et al., 2019; Zhang et al., 2019b). Teknologi kendaraan bawah laut otonom juga memainkan peran penting dalam mengurangi risiko dan biaya yang terkait dengan kegiatan eksploitasi laut. Dengan kemampuan untuk beroperasi secara mandiri dan melakukan tugas-tugas tertentu tanpa campur tangan manusia, kendaraan bawah laut otonom memungkinkan untuk eksplorasi yang lebih intensif dan eksploitasi sumber daya laut yang lebih efisien. Selain itu, teknologi ini dapat digunakan untuk memantau secara kontinu aktivitas manusia di laut dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan (Sahoo et al., 2019; Singh & Aujla, 2021; Woo et al., 2021).

8.4.2 Implikasi Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan dari Pertumbuhan Sektor Ini

Pertumbuhan sektor pemanfaatan sumber daya non-hayati laut memiliki implikasi yang signifikan dalam berbagai aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Pertama, terkait dengan implikasi sosial, pertumbuhan sektor ini dapat menciptakan peluang ekonomi baru dan meningkatkan lapangan kerja di sektor maritim, yang dapat memberikan dampak positif pada komunitas lokal dan ekonomi pesisir. Namun, pertumbuhan yang tidak terkendali juga dapat menimbulkan konflik antara kepentingan ekonomi dengan kebutuhan konservasi dan perlindungan lingkungan, serta masyarakat adat yang bergantung pada sumber daya laut untuk keberlangsungan hidup mereka (Zhong, 2019). Kedua, dari segi ekonomi, pertumbuhan sektor pemanfaatan sumber daya non-hayati laut dapat

memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi nasional dan global. Investasi dalam eksplorasi, pengembangan, dan infrastruktur laut dapat menciptakan peluang bisnis baru dan meningkatkan daya saing ekonomi suatu negara. Namun, penting untuk memperhitungkan biaya sosial dan lingkungan dari kegiatan eksploitasi laut dalam mengukur manfaat ekonomi ini (Zhong, 2019).

Terakhir, implikasi lingkungan, dampak lingkungan dari pertumbuhan sektor pemanfaatan sumber daya non-hayati laut juga perlu diperhatikan secara serius. Aktivitas seperti penambangan mineral bawah laut, instalasi infrastruktur bawah laut, dan pengeboran minyak dan gas dapat menyebabkan degradasi habitat laut, kerusakan ekosistem, dan penurunan keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, pengelolaan yang berkelanjutan dan pemantauan lingkungan yang ketat diperlukan untuk memastikan bahwa pertumbuhan sektor ini tidak merusak lingkungan laut yang rentan. Dengan memperhatikan implikasi sosial, ekonomi, dan lingkungan dari pertumbuhan sektor pemanfaatan sumber daya non-hayati laut, langkah-langkah kebijakan yang bijaksana dan berkelanjutan dapat diambil untuk memastikan bahwa potensi ekonomi sektor ini dapat direalisasikan tanpa mengorbankan keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat (Van Dover, 2011; Agardy & Claudet, 2018).

8.5 Kesimpulan

8.5.1 Peneguhan Pentingnya Pemanfaatan Sumber Daya Non-Hayati Laut secara Berkelanjutan

Kesimpulan dari kajian ini menegaskan pentingnya pemanfaatan sumber daya non-hayati laut secara berkelanjutan. Sumber daya non-hayati laut memiliki potensi besar untuk mendukung berbagai sektor, mulai dari energi terbarukan hingga penelitian ilmiah, dan dari transportasi laut hingga eksploitasi mineral bawah laut. Namun, untuk memanfaatkan potensi ini secara maksimal, penting untuk melaksanakan prinsip-prinsip pengelolaan yang berkelanjutan. Hal ini mencakup perlindungan terhadap habitat laut yang sensitif, pengelolaan yang bertanggung jawab terhadap ekosistem laut, dan pembentukan kebijakan yang memperhitungkan keberlanjutan lingkungan dan sosial.

8.5.2 Tantangan dan Peluang di Masa Depan untuk Pengembangan Lebih Lanjut

Meskipun potensi pemanfaatan sumber daya non-hayati laut sangat besar, tetapi juga dihadapkan pada sejumlah tantangan dan peluang di masa depan. Tantangan tersebut termasuk mengelola dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya laut, menangani konflik kepentingan antara kebutuhan ekonomi dan perlindungan lingkungan, serta memperhitungkan dampak sosial dari pertumbuhan sektor ini. Namun, dengan tantangan datang juga peluang. Kemajuan teknologi, kebijakan yang bijaksana, dan kolaborasi lintas sektor dapat membantu mengatasi tantangan ini dan membuka jalan bagi pengembangan lebih lanjut dalam pemanfaatan sumber daya non-hayati laut secara berkelanjutan.

Dengan demikian, kesimpulan ini menegaskan bahwa pemanfaatan sumber daya non-hayati laut merupakan aspek penting dalam memastikan keberlanjutan ekonomi, lingkungan, dan sosial di masa depan. Dengan mengambil pendekatan yang berkelanjutan dan holistik, kita dapat memanfaatkan potensi sumber daya laut untuk kepentingan bersama sambil menjaga integritas lingkungan laut yang sangat berharga bagi kehidupan di bumi.

Bab 9

PENGELOLAAN LINGKUNGAN RUANG AIR

Kebudayaan air sangat penting bagi kelangsungan perkembangan kota. Isu air dalam perencanaan perkotaan melampaui sekadar menyediakan infrastruktur air untuk aktivitas kota. Hal ini juga melibatkan pertimbangan terhadap masalah di lingkungan sekitar, seperti pada perencanaan kota mampu mempertahankan ketersediaan sumber daya air, yang juga dikenal sebagai kapasitas dukungan air (Cita, 2020).

Daya dukung air adalah kemampuan sumber daya air untuk memenuhi kebutuhan dengan meninjau besarnya ketersediaan air. Ini dihitung dengan menghitung kebutuhan air dan ketersediaan air, dan keduanya dibandingkan untuk mengetahui seberapa banyak air yang tersedia (Santoso, 2015). Pada saat ini, ada ketidakseimbangan antara kebutuhan air lapangan dan jumlah air yang tersedia. Karena permintaan air terus meningkat, ketersediaan air terus menurun. Menurut Undang-Undang Sumber Daya Air, pengaturan ketidakseimbangan antara ketersediaan air dan kebutuhan air harus dilakukan secara efektif dengan mempertimbangkan fungsi lingkungan sosial dan ekonomi (Haryanto, 2013).

Ruang air adalah rangkaian pusat-pusat sistem infrastruktur air tanah dan sumber daya air tanah yang terletak di cekungan air tanah (cekungan air tanah) dan akuifer tertekan (akuifer tertekan) dan akuifer bebas (akuifer bebas). Air tanah dalam hal ini bukan hanya air tanah yang diterjemahkan dari air tanah, tetapi juga air tanah yang diterjemahkan dari air tanah. Di atas air tanah ada zona vazozze yang berisi air tanah (Kodoatie, 2021).

9.1 Informasi Daya Dukung dan Daya Tampung Air Nasional

Ketersediaan air yang layak merupakan komponen penting dari kehidupan, yang sangat dibutuhkan secara merata dan berkecukupan di seluruh wilayah Indonesia (**Gambar 9.1**). Karena air berperan penting dalam mempertahankan keberlanjutan dan keberlangsungan ekosistem, pemanfaatan, dan kelestarian sumber daya air sangat penting.



Gambar 9.1 Peta Daya Dukung Air
(Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2019)

Menurut UU No. 32/2009, daya dukung lingkungan hidup didefinisikan sebagai kemampuan lingkungan untuk mendukung perikehidupan manusia dan makhluk hidup lain dan menjaga keseimbangan antar keduanya. Sumber daya yang tersedia untuk mendukung keberlangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain dianalogikan sebagai daya dukung. Dengan kata lain, untuk mengarahkan pembangunan yang tepat, penting untuk memahami daya dukung sumber daya yang dimiliki dan faktor-faktor yang mempengaruhi keberlanjutan fungsinya. Pemahaman tentang karakteristik bentang alam, jenis vegetasi, dan kecenderungan perubahan penutupan lahan adalah penting untuk mengarahkan pembangunan yang tepat (Lisdiyono, 2018). D3T Air Nasional dihitung berdasarkan

inventarisasi lingkungan hidup di tingkat wilayah ekoregion, yang mencakup populasi penduduk, potensi dan ketersediaan sumber daya alam, dan pemanfaatan sumber daya alam. Potensi dan kegiatan ekonomi berbasis lahan mencakup alokasi wilayah untuk pertanian, perikanan, perkebunan, pemukiman, dan lahan terbangun. D3T Air Nasional juga diperoleh dari perhitungan perbedaan ketersediaan air yang dihitung dari nilai jasa lingkungan hidup sebagai penyedia air dibandingkan dengan jumlah pemanfaatan air termasuk untuk kebutuhan rumah tangga berdasarkan jumlah penduduk. Namun, proses perhitungan ini tidak selalu menghasilkan hasil D3T Air Nasional. Dalam proses penetapan D3T Air Nasional, analisis kecenderungan perubahan kinerja jasa lingkungan hidup sebagai pengaturan air juga digunakan untuk memprediksi keberlanjutan ketersediaan air (Purba, 2022).

9.2 Konsep Daya Dukung Air

Sebelum melihat peraturan, konsep daya dukung air dipertimbangkan dalam perencanaan. Dalam perencanaan dan pembangunan baru, pertimbangan daya dukung—juga dikenal dalam literatur sebagai kapasitas membawa—mulai sekitar tahun 1970an. Meadows dan McHarg dalam "*Limit to growth*" pertama kali memperkenalkannya (Neuman, 2015). Penambahan konsep kapasitas bawaan dalam bidang ekologi adalah langkah penting dalam memahami dinamika populasi dan dampaknya terhadap lingkungan. Kapasitas bawaan mengacu pada jumlah maksimum individu spesies yang dapat dibantu oleh lingkungannya dalam jangka waktu tertentu tanpa mengalami degradasi yang signifikan pada lingkungan tersebut. Dalam konteks perencanaan, konsep *carrying capacity* berkembang menjadi lebih terintegrasi dengan upaya untuk mempertahankan keseimbangan ekologis sambil memenuhi kebutuhan manusia.

Awalnya, *carrying capacity* diperkenalkan oleh Meadows dan McHarg sebagai *supportive carrying capacity*, yang mengacu pada kemampuan lingkungan untuk mendukung aktivitas manusia. Ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan kapasitas lingkungan dalam perencanaan pembangunan dan penggunaan lahan. Namun, seiring dengan perkembangan teori perencanaan, konsep *carrying capacity* mulai diperluas untuk juga mencakup kapasitas bawaan dalam konteks

pelestarian lingkungan alam. Dengan memperhitungkan *carrying capacity* secara menyeluruh dalam perencanaan, dapat diharapkan bahwa pengembangan dan aktivitas manusia akan lebih berkelanjutan. Ini mencakup membatasi jumlah populasi manusia atau aktivitas lainnya sehingga tidak melebihi batas kemampuan lingkungan untuk mendukungnya. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat tercipta keseimbangan antara kebutuhan manusia dan pelestarian lingkungan.

Konsep *carrying capacity* berevolusi lebih lanjut untuk mencakup pertimbangan tentang batas polusi pada lingkungan, yang dikenal sebagai *assimilative carrying capacity*. Fokus utamanya adalah pada kemampuan lingkungan untuk menyerap atau mengatasi polutan yang dihasilkan oleh aktivitas manusia, khususnya dalam konteks sanitasi lingkungan dan manajemen limbah. Pada periode ini, perencanaan kota dan lingkungan mulai memperhatikan lebih serius dampak polusi terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Dengan demikian, *carrying capacity* tidak hanya dilihat sebagai batas jumlah individu atau aktivitas yang dapat didukung oleh lingkungan, tetapi juga sebagai batasan atas tingkat polusi yang dapat diterima oleh lingkungan tanpa mengalami dampak negatif yang signifikan hingga terus berkembang menjadi lebih holistik dalam perencanaan untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. Fokusnya tidak hanya pada polusi, tetapi juga memperhitungkan batas penggunaan sumber daya alam, seperti air dan daya dukung ekosistem secara keseluruhan. Ini mencerminkan pergeseran paradigma menuju pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan. Dengan mengintegrasikan pertimbangan *carrying capacity* yang lebih luas dalam perencanaan, diharapkan bahwa pembangunan dapat berlangsung secara berkelanjutan, memperhitungkan kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi masa depan untuk memenuhi kebutuhan mereka (Utomo, 2021).

Dalam perencanaan, daya dukung lingkungan, termasuk sumber daya air, harus dipertimbangkan dari tiga sudut pandang: kapasitas yang tersedia secara alami merujuk pada kemampuan individu atau masyarakat dalam merancang, membangun, dan menjaga infrastruktur fisik seperti jalan, jembatan, sistem air bersih, dan sebagainya (Dedy,

2023). Konsep kerjasama antar stekholder dalam pembangunan infrastruktur dapat dilihat pada **Gambar 9.2**



Gambar 9.2 Konsep Kerjasama Antar Stekholder dalam Pembangunan Infrastruktur

(Sumber: <https://bappeda.jogjaprovo.go.id/artikel/detail/52-strategi-penyelenggaraan-infrastruktur-bidang-pu-untuk-meningkatkan-kualitas-lingkungan>)

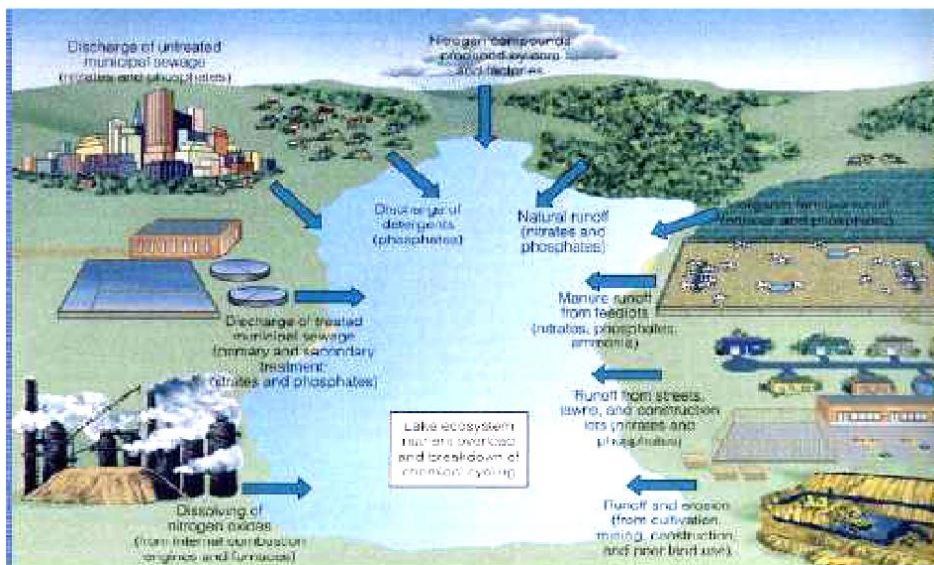
Secara umum, beberapa sumber air yang dapat digunakan sebagai alternatif sumber air bersih adalah sebagai berikut:

9.2.1 Air Permukaan

Air permukaan adalah semua air yang ada di atas permukaan tanah. Kategori air permukaan termasuk air laut, air dalam danau, sungai, waduk, dan rawa merupakan sumber daya alam yang vital dan berperan penting dalam mendukung kehidupan. Sungai, khususnya, sering digunakan sebagai sumber air baku untuk sistem air bersih, irigasi pertanian, keperluan industri, dan berbagai kegiatan lainnya. Namun, ketersediaan dan kualitas air sungai sangat dipengaruhi oleh musim dan kondisi lingkungan.

Air tawar dapat membentuk ekosistem pada permukaan bumi, seperti danau atau sungai. Faktor yang paling memengaruhi ekosistem perairan adalah oksigen terlarut, yang membantu fotosintesis, respirasi, dan penguraian dalam perairan, dan cahaya matahari, yang mengontrol

suhu dan membantu proses fotosintesis. Beberapa masalah utama yang terjadi pada air permukaan adalah pengeringan atau gangguan kondisi alami (seperti dampak dari pembuatan waduk atau irigasi); pencemaran badan air (**Gambar 9.3**), seperti limbah industri dan domestik; dan limbah pertanian yang dapat menyebabkan eutrofikasi, suatu proses perubahan fisi, kimia, dan biologis yang terjadi dalam suatu badan perairan (biasanya aliran lambat) karena banyaknya zat hara berupa N dan P.



Gambar 9.3. Pencemaran pada Air di Permukaan
(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum, 2019)

9.2.2 Air Bawah Tanah

Mata air adalah keluaran air tanah yang terjadi secara alami dari permukaan tanah. Ada debit sungai yang relatif tetap, tetapi ada yang berubah-ubah (fluktuatif) karena perubahan musim. Beberapa sumber air, seperti mata air, dapat mengalami perubahan aliran yang signifikan tergantung pada musim. Pada musim kemarau, beberapa mata air mungkin tidak mengalirkan air sama sekali, tetapi akan kembali mengalir saat musim penghujan tiba. Fenomena ini menunjukkan ketergantungan sumber air terhadap pola cuaca dan iklim setempat. Air tanah juga merupakan sumber air yang penting, yang dapat berbeda dalam jumlahnya antara satu wilayah dengan wilayah lainnya. Hal ini

tergantung pada sejumlah faktor, termasuk cadangan air yang tersedia dalam lapisan *aquifer* dan kapasitas infiltrasi tanah di daerah tersebut.

Aquifer, atau lapisan pembawa air bawah tanah, dapat terdiri dari berbagai jenis material seperti pasir, kerikil, dan batuan yang jenuh dengan air. Ada dua jenis utama *aquifer*: *aquifer* tidak tertekan (*unconfined aquifer*) dan *aquifer* tertekan (*confined aquifer*). *Aquifer* tidak tertekan mendapat pasok air dari proses infiltrasi, sementara *aquifer* tertekan mendapatkan air dari daerah pengisian atau resapan air. Muka air tanah merupakan batas yang memisahkan antara air bawah tanah yang jenuh dan air tanah. Perubahan dalam muka air tanah dapat mencerminkan perubahan kondisi hidrologis, seperti curah hujan, pengambilan air tanah, atau perubahan dalam tingkat infiltrasi air hujan. Pemahaman yang baik tentang sistem air tanah adalah kunci untuk manajemen yang berkelanjutan dari sumber daya air yang penting ini. Musim hujan meningkatkan muka air tanah, sedangkan musim kemarau menurunkannya. Penyebaran air tanah tidak merata karena sifat tutupan lahan dan kondisi hidrogeologi daerah tersebut.

9.3 Regulasi Perencanaan untuk Daya Dukung Air

Perencanaan kota harus mempertimbangkan daya dukung air berdasarkan setidaknya tiga undang-undang: UU No. 26 tahun 2007 tentang Penataan ruang, UU No. 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, dan UU No. 17 tahun 2019 tentang Sumber Daya Air. Konsep dan cakupan dari undang-undang ini dapat dilihat di Tabel 9.1.

Tabel 9.1 Peraturan Perundang-Undangan tentang Cakupan Daya Dukung Air

Peraturan	Cakupan Daya Dukung	Cakupan Sumber Daya Air dan Daya Dukung Air
UU 26/2007 tentang Penataan Ruang Permen PU No 17/PRT/M/2009 tentang Pedoman penyusunan rencana tata ruang wilayah kota	Disebutkan bahwa penataan ruang perlu memperhatikan daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup untuk keberlanjutan, akan tetapi tidak dijelaskan lebih lanjut dan penjelasannya diserahkan pada bidang lingkungan hidup. Daya dukung lebih dilihat sebagai kapasitas untuk perencanaan struktur ruang dan pola ruang dari sisi lingkungan.	Air tidak disebutkan secara spesifik sebagai sumber daya lingkungan, walaupun disebutkan perlunya konservasi untuk menjaga lingkungan. Adanya penatagunaan air termasuk alami dan buatan/prasarana. Kondisi alami termasuk meteorologi, klimatologi, geofisika dan kondisi buatan dari prasarana sumber daya air, jaringan drainase dan pengendalian banjir.
UU 32/2009 Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Permen Lingkungan Hidup No 17/2009 tentang Pedoman Penentuan Daya Dukung Lingkungan Hidup dalam Penataan Ruang Wilayah	Lebih jelas mendefinisikan daya dukung dan daya tampung yang disebutkan dalam UU Penataan Ruang, dimana daya dukung lebih melihat kemampuan untuk menyediakan sumberdaya lingkungan sedangkan daya tampung kemampuan lingkungan untuk menetralsisir polutan. Pertimbangan daya dukung masuk dalam RPPLH (Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup) untuk penyusunan RPJP/MD, juga dalam KLHS (Kajian Lingkungan Hidup Strategis) untuk penyusunan RTRW dan juga RPJP/MD.	Pada UU terlihat pendekatan batasannya adalah ekoregion yang memperhatikan karakteristik batasan alami lingkungan termasuk sumber daya air, akan tetapi pada Permen terlihat lebih memberikan pedoman perencanaan kota dengan batasan wilayah administratif. Hal ini menyebabkan pertimbangan kapasitas air menjadi terbatas yaitu dari curah hujan dan limpasan. Daya dukung air tidak melihat kapasitas dari ketersediaan infrastruktur/prasarana.
UU 17/2019 Sumber Daya Air	Disebutkan bahwa pengelolaan sumber daya air perlu melihat keseimbangan ekosistem dan daya dukung lingkungan. Disini terlihat bahwa sumber daya air termasuk bagian dari lingkungan ekosistem.	Sumber Daya Air adalah air, sumber air, dan daya air yang terkandung di dalamnya. Air yang dimaksud adalah air permukaan, air tanah, air hujan, dan air laut yang berada di darat. Perlunya menyusun rencana pengelolaan sumber daya air. Dalam pengelolaan sumber daya air melihat bagaimana perlunya konservasi sumbernya dan bagaimana pengelolaan prasarananya (infrastruktur).

(Sumber: Wigjoseptina, 2020)

9.4 Daya Dukung Lingkungan dan Hubungannya dengan Perkembangan Kota yang Terus Berlanjut

Ada dua konsep inti pembangunan berkelanjutan: konsep kebutuhan (atau konsep kebutuhan) dan konsep keterbatasan. Konsep kebutuhan berfokus pada peningkatan kualitas hidup manusia, sementara gagasan keterbatasan berkaitan dengan seberapa mudah dan mampu lingkungan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Jika kebutuhan dan keterbatasan saat ini dapat diimbangi, pembangunan dapat dilanjutkan. Ada dua cara untuk mencapai keseimbangan: pertama, dengan mengontrol kebutuhan melalui perubahan perilaku konsumsi; kedua, dengan mengembangkan kemampuan untuk mengatasi hambatan melalui kemajuan dalam bidang teknologi, keuangan, dan bisnis.

Tindakan saat ini harus mempertimbangkan keberlanjutan dalam jangka panjang untuk memenuhi kebutuhan. Kelangsungan hidup manusia bergantung pada daya dukung alam. Karena itu harus dijaga agar tidak merusak atau membahayakan kehidupan di dalamnya. Dua komponen umum yang berkontribusi pada kerusakan daya dukung alam :

9.4.1. Faktor Internal

Faktor internal dalam konteks kerusakan lingkungan mengacu pada faktor-faktor yang berasal dari dalam sistem atau entitas tersebut, tidak terkait dengan intervensi eksternal. Dalam konteks ini, kerusakan internal mengacu pada kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh aktivitas manusia atau oleh faktor-faktor yang ada di dalam sistem lingkungan itu sendiri (**Gambar 9.4**). Aktivitas manusia seperti pembuangan limbah industri, polusi kendaraan bermotor, dan penggunaan pestisida yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang merusak ekosistem alami.



Gambar 9.4. Kerusakan Faktor Internal
(Sumber: Pixabay/Yogendras31 *dalam* Ragam Info, 2023)

9.4.2. Faktor Eksternal

Kerusakan lingkungan yang disebabkan pada aktifitas dari industri, seperti pencemaran tanah, air, laut, dan udara, umumnya

dikenal sebagai kerusakan karena faktor eksternal (**Gambar 9.5**). Lingkungan itu sendiri meliputi aspek-aspek sosial, fisik, dan biologis, mencakup baik komponen alamiah maupun buatan manusia. Selain itu, konsep daya dukung lingkungan dapat dibagi menjadi dua kategori utama: daya dukung alamiah dan daya dukung sosial. Daya dukung alamiah merujuk pada kemampuan lingkungan alam untuk menopang keberlangsungan hidup organisme dan proses alam secara keseluruhan. Sementara itu, daya dukung sosial melibatkan ketersediaan sumber daya manusia dan keuangan yang dapat digunakan untuk memelihara dan menjaga lingkungan.



Gambar 9.5 Kerusakan Faktor Eksternal
(Sumber: Corne, 2022)

Dengan demikian, ketika industri atau kegiatan manusia lainnya melebihi batas kemampuan lingkungan alamiah untuk menanggung dampaknya, terjadi kerusakan lingkungan. Penyadaran akan pentingnya mempertimbangkan kedua aspek daya dukung ini penting dalam menjaga keseimbangan antara pembangunan ekonomi dan pelestarian lingkungan.

9.5 Estimasi Kebutuhan Air di Kota

Teknik estimasi populasi masa depan sangat penting untuk perencanaan dan penilaian program pemerintah pusat dan daerah.

Proyek jumlah penduduk adalah salah satu persyaratan minimum proses perencanaan pembangunan. Prediksi populasi dapat dilakukan dengan tiga metode, yaitu:

9.5.1 *Mathematical Method*

Dalam kasus di mana data tentang komponen pertumbuhan populasi tidak tersedia, metode matematika digunakan; dalam hal ini perhitungan pada populasi keseluruhan.

9.5.2 Metode Linier yang Menggunakan Aritmatik dan Geometrik

Metode linier yang menggunakan pendekatan aritmatik dalam memproyeksikan jumlah penduduk masa depan sering disebut sebagai metode proyeksi aritmatik. Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa pertumbuhan populasi terjadi pada tingkat yang konstan dari periode ke periode.

9.5.2.1 Metode Linier Menggunakan Aritmatik

Metode yang digunakan untuk pertumbuhan penduduk adalah:

$$P_n = P_0 (1+rn) \dots\dots\dots \text{Persamaan 1}$$

P_n : jumlah penduduk pada tahun n

P_0 : jumlah penduduk awal tahun (dasar)

n : periode waktu dalam tahun

r : angka pertumbuhan penduduk (rata-rata pertumbuhan penduduk per tahun)

Metode proyeksi aritmatik memiliki kelemahan dalam menangkap fluktuasi atau perubahan yang mungkin terjadi dalam tingkat pertumbuhan populasi. Ini karena asumsi dasarnya adalah bahwa pertumbuhan populasi terjadi pada tingkat yang konstan dari periode ke periode, yang mungkin tidak selalu mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan.

9.5.2.2. Metode Linier Menggunakan Geometrik

Metode ini menjelaskan bahwa perkembangan pada jumlah penduduk (konsumen) secara otomatis bersifat ganda. Metode geometrik

untuk menghitung proyeksi jumlah konsumen dinyatakan dengan persamaan:

$$P_n = P_o (1+r)^n \dots\dots\dots \text{Persamaan 2}$$

P_n : jumlah penduduk tahun ke- n
 P_o : jumlah penduduk tahun awal
 r : rata-rata prosentase pertambahan penduduk per tahun
 n : periode waktu proyeksi

Metode ini cocok untuk wilayah dengan pertambahan penduduk berganda, dengan kepadatan penduduk yang paling tinggi pada jangka waktu yang cukup lama.

9.5.3. Metode linier dengan Cara *Last Square*

Memproyeksikan jumlah penduduk masa depan berdasarkan tren pertumbuhan dari data masa lalu. Dalam metode regresi linier, digunakan garis regresi untuk memodelkan hubungan antara variabel independen (biasanya waktu) dan variabel dependen (jumlah penduduk). Persamaannya adalah :

$$P_n = a + b (t) \dots\dots\dots \text{Persamaan 3}$$

t : tambahan tahun terhitung dari tahun dasar
 a : Persamaan 4
 b : Persamaan 5
 n : periode perencanaan

9.5.4. Non Linier dengan Cara Eksponensial

Pertumbuhan penduduk secara terus menerus dengan angka pertumbuhan konstan menggambarkan pertumbuhan penduduk yang linier dari waktu ke waktu. Ini berarti bahwa jumlah penduduk akan bertambah sebesar jumlah yang sama setiap periode waktu tertentu. Rumus persamaan sebagai berikut :

.....Persamaan 6

P_n atau P_t : jumlah penduduk pada tahun n atau t
 P_0 : jumlah penduduk pada awal tahun
 r : angka pertumbuhan penduduk (%)
 n atau t : waktu proyeksi (tahun)
 e : bilangan pokok dari sistem logaritma natural yang besarnya sama dengan 2,7182818.

Proyeksi jumlah penduduk untuk beberapa tahun ke depan memang merupakan faktor penting dalam menentukan kebutuhan air domestik di suatu wilayah. Semakin tinggi jumlah penduduk, semakin besar kebutuhan akan pasokan air bersih untuk keperluan domestik, seperti minum, mandi, mencuci, memasak, dan sanitasi. Namun, kebutuhan air domestik juga dipengaruhi oleh faktor-faktor sosial, budaya, dan ekonomi. Misalnya, pola perilaku masyarakat dalam menggunakan air, standar kesehatan dan sanitasi, serta tingkat penggunaan air untuk keperluan tertentu seperti pertanian, industri, dan komersial, semuanya dapat memengaruhi jumlah total air yang digunakan di suatu wilayah.

9.6 Kebutuhan Air untuk Industri

Salah satu pilar ekonomi negara adalah industri, dan menangannya harus dilakukan secara efektif untuk mencapai nilai tambah yang maksimal. Berdasarkan jenis produk yang dihasilkannya. Sementara itu, berdasarkan skala operasinya, industri dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah tenaga kerja yang terlibat dalam operasinya, yaitu:

1. Industri kecil, dengan jumlah tenaga kerja 1 – 19 orang
2. Industri sedang, dengan jumlah tenaga kerja 20 – 99 orang
3. Industri besar, dengan jumlah tenaga kerja lebih dari 100 orang

Dalam suatu industri, air biasanya untuk kebutuhan setiap hari. Besarnya suatu industri antara lain ditentukan oleh kebutuhan satuan produksi atau unit, kebutuhan air per tenaga kerja, dan kebutuhan untuk meningkatkan nilai atau nilai produksi. Standar kebutuhan air untuk berbagai kegiatan industri disajikan pada Tabel 9.2.

Tabel 9.2 Standar konsumsi air untuk kebutuhan industri

Fasilitas	Jumlah	Satuan
Industri	120 *)	Liter/orang/hari
	2-3 **)	M3/hari/unit

(Sumber : Ekonomi Sumberdaya Alam dan Lingkungan)

Pentingnya mempertimbangkan daya dukung lingkungan dalam perencanaan kota sangatlah krusial untuk mencapai pembangunan yang berkelanjutan dan berdaya tahan. Daya dukung lingkungan merujuk pada kapasitas lingkungan untuk menopang kehidupan manusia dan ekosistem, dan mempertimbangkannya dalam perencanaan kota akan membantu menjaga keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian lingkungan.

Dalam konteks perencanaan kota di Indonesia, terdapat beberapa dokumen perencanaan yang memperhitungkan daya dukung lingkungan secara langsung, antara lain:

1. Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (RPPLH)**: RPPLH bertujuan untuk membangun dasar bagi pembangunan daerah melalui rencana tata ruang jangka panjang (RPJPD) dan rencana pembangunan jangka menengah (RPJMD). Dokumen ini memberikan kerangka kerja untuk melindungi dan mengelola lingkungan hidup secara holistik, sehingga mendukung pembangunan daerah yang berkelanjutan.
2. Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS)**: KLHS berfungsi sebagai landasan untuk penyusunan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) dan Rencana Pembangunan Jangka Panjang/Menengah Daerah (RPJP/MD). KLHS mengidentifikasi dampak lingkungan dari rencana dan kebijakan pembangunan, serta merumuskan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak tersebut. Dalam proses KLHS, daya dukung lingkungan juga menjadi faktor kunci yang harus dipertimbangkan.

Dengan memperhitungkan daya dukung lingkungan dalam kedua dokumen perencanaan tersebut, diharapkan bahwa pembangunan kota dapat berlangsung secara berkelanjutan. Hal ini akan membantu memastikan bahwa kebutuhan saat ini dipenuhi tanpa mengorbankan

kemampuan lingkungan untuk mendukung kehidupan masa depan. Penting juga untuk memperhatikan bahwa pembangunan kota yang berkelanjutan harus mempertimbangkan berbagai aspek, termasuk kebutuhan air, infrastruktur, dan karakteristik masyarakat setempat, serta memperhitungkan berbagai standar dan peraturan yang berlaku baik di tingkat nasional maupun internasional.

Bab 10

PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP LINGKUNGAN RUANG LAUT

10.1 Pendahuluan

Ruang laut menjadi fokus utama dalam pemahaman dinamika lingkungan laut serta keterkaitannya dengan manusia dan ekosistem. Ruang laut, yang meliputi perairan laut dan dasar laut, memiliki peran krusial dalam menjaga keseimbangan global. Sebagai sumber daya alam yang kaya, ruang laut menyediakan berbagai keuntungan ekonomi, seperti sumber daya ikan, energi terbarukan, dan potensi pariwisata. Selain itu, ruang laut juga berperan penting dalam mengatur iklim global melalui proses seperti penyimpanan karbon, regulasi suhu, dan distribusi panas (Jiang *et al.*, 2024).

Namun, meningkatnya aktivitas manusia di laut, seperti penangkapan ikan berlebihan, polusi, dan pembangunan pesisir, telah mengancam integritas lingkungan ruang laut. Perubahan iklim menjadi faktor krusial yang memperparah kondisi ini, dengan meningkatnya suhu laut, peningkatan tinggi permukaan laut, dan intensifikasi badai laut. Dalam konteks ini, pemahaman mendalam tentang latar belakang dan pentingnya ruang laut menjadi krusial untuk mengembangkan strategi yang berkelanjutan dalam pengelolaan dan pelestariannya. Dengan demikian, upaya konservasi dan pengelolaan ruang laut harus didasarkan pada pengetahuan ilmiah yang kokoh serta kerjasama lintas sektor dan internasional (Gladstone-Gallagher *et al.*, 2024). Hal ini penting untuk memastikan kelangsungan hidup ekosistem laut dan kesejahteraan manusia di masa depan.

Perubahan iklim merujuk pada perubahan jangka panjang dalam pola cuaca rata-rata di Bumi, baik dalam skala regional maupun global.

Hal ini sering kali dihubungkan dengan peningkatan suhu rata-rata permukaan Bumi, yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, menjadi penyebab utama peningkatan konsentrasi gas rumah kaca ini. Dampak perubahan iklim secara global sangat beragam dan luas. Beberapa dampak yang paling nyata termasuk peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, peningkatan tinggi permukaan laut, dan intensifikasi bencana alam seperti badai tropis, banjir, dan kekeringan. Selain itu, perubahan iklim juga berdampak pada ekosistem, menyebabkan pergeseran habitat dan migrasi spesies, serta mengancam keanekaragaman hayati. Dampaknya tidak hanya terbatas pada lingkungan alam, tetapi juga berdampak pada kesehatan manusia, pangan, air, keamanan pangan, dan ekonomi. Negatifnya, perubahan iklim dapat meningkatkan risiko konflik sosial dan politik, terutama di daerah yang rentan terhadap krisis lingkungan. Untuk mengurangi dampak perubahan iklim, upaya mitigasi dan adaptasi menjadi sangat penting. Ini melibatkan mengurangi emisi gas rumah kaca dengan beralih ke energi terbarukan, mengurangi deforestasi, serta mengembangkan infrastruktur dan kebijakan yang tahan terhadap perubahan iklim (Gladstone-Gallagher *et al.*, 2024). Upaya kolaboratif secara global juga diperlukan untuk menghadapi tantangan ini dengan efektif.

Perubahan iklim memiliki dampak yang signifikan terhadap ruang laut, mempengaruhi ekosistem laut dan aktivitas manusia yang tergantung padanya. Salah satu dampak yang paling jelas adalah peningkatan suhu laut global, yang mempengaruhi dinamika laut, termasuk pola arus laut, distribusi spesies, dan ketersediaan nutrisi. Perubahan iklim juga menyebabkan peningkatan tinggi permukaan laut, mengancam pulau-pulau kecil dan wilayah pesisir dengan risiko banjir yang lebih tinggi. Selain itu, perubahan iklim dapat mempengaruhi keberlanjutan sumber daya laut, seperti penurunan populasi ikan akibat perubahan suhu air dan asam laut yang tinggi. Perubahan suhu laut juga dapat memicu pemutihan terumbu karang, mengancam keanekaragaman hayati dan ekosistem terumbu karang yang penting. Dampak perubahan iklim juga dapat mempengaruhi aktivitas manusia di laut, termasuk sektor perikanan, pariwisata, dan transportasi laut. Perubahan pola cuaca

ekstrem, seperti badai yang lebih kuat dan lebih sering, dapat mengganggu operasi perikanan dan infrastruktur pesisir. Peningkatan tinggi permukaan laut juga dapat mengancam infrastruktur pesisir dan kota-kota pantai, serta mengganggu kegiatan transportasi laut dan pariwisata. Pemahaman yang mendalam tentang dampak perubahan iklim terhadap ruang laut menjadi krusial dalam mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi yang tepat untuk melindungi ekosistem laut dan mendukung keberlanjutan aktivitas manusia yang tergantung pada laut. Ini membutuhkan kerjasama lintas sektor dan internasional, serta upaya bersama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim (Shao, 2024).

10.2 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Komponen Ruang Laut

Kenaikan permukaan laut adalah fenomena yang disebabkan oleh sejumlah faktor, tetapi yang paling signifikan adalah perubahan iklim. Penyebab utama kenaikan permukaan laut termasuk pelelehan es di kutub, termasuk Greenland dan Antartika, serta perubahan termal laut yang menyebabkan air laut mengembang ketika suhunya meningkat. Dampak dari kenaikan permukaan laut sangat luas dan serius. Ini termasuk ancaman terhadap wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil yang rentan terhadap banjir rob, intrusi air laut ke tanah gambut, dan hilangnya habitat pesisir yang penting seperti mangrove. Selain itu, kenaikan permukaan laut juga meningkatkan risiko kerusakan infrastruktur pesisir, seperti pelabuhan, jalan raya, dan pemukiman, serta meningkatkan risiko kehilangan sumber daya dan kehilangan keamanan pangan bagi masyarakat yang bergantung pada ekosistem pesisir. Untuk mengatasi kenaikan permukaan laut, perlu diambil tindakan mitigasi dan adaptasi yang tepat. Langkah-langkah mitigasi termasuk upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang menyebabkan perubahan iklim, seperti dengan beralih ke energi terbarukan dan mengurangi deforestasi. Sedangkan langkah-langkah adaptasi mencakup pembangunan infrastruktur yang tahan terhadap perubahan iklim, seperti tanggul laut, sistem drainase yang ditingkatkan, dan perencanaan tata ruang yang adaptif. Selain itu, solusi jangka panjang untuk mengatasi kenaikan permukaan laut juga melibatkan upaya bersama secara global untuk mengurangi pemanasan global dan meningkatkan ketahanan masyarakat

yang rentan terhadap perubahan iklim. Ini memerlukan kerjasama internasional yang kokoh dan komitmen untuk melindungi dan memelihara lingkungan laut bagi generasi mendatang (Nursey-Bray *et al.*, 2024).

Pengasaman laut terjadi ketika jumlah karbon dioksida (CO₂) yang terlarut di dalam air laut meningkat, menyebabkan penurunan pH air laut secara bertahap. Mekanisme utama pengasaman laut adalah penyerapan CO₂ oleh air laut, yang membentuk asam karbonat dan mengurangi ketersediaan ion karbonat yang diperlukan oleh organisme laut untuk membentuk kerangka karang dan struktur kalsium lainnya. Konsekuensi dari pengasaman laut sangat beragam dan serius. Salah satunya adalah penurunan kesehatan ekosistem laut, termasuk kerusakan pada terumbu karang dan keanekaragaman hayati laut lainnya. Organisme laut yang memiliki kerangka atau cangkang kalsium karbonat, seperti karang, moluska, dan plankton, menjadi rentan terhadap pengasaman laut yang dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan mereka. Selain itu, pengasaman laut juga dapat mempengaruhi rantai makanan laut dan mengganggu keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan. Untuk mengurangi dampak pengasaman laut, langkah-langkah mitigasi diperlukan. Salah satunya adalah mengurangi emisi CO₂ ke atmosfer dengan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan mengembangkan energi terbarukan. Upaya lain melibatkan pelestarian ekosistem laut yang sehat, seperti melindungi terumbu karang dan mengurangi polusi laut yang dapat memperburuk kondisi pengasaman laut. Selain itu, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan teknologi mitigasi yang lebih lanjut, seperti pertanian laut karang yang dapat membantu mengimbangi penurunan pH di wilayah-wilayah tertentu. Namun, solusi jangka panjang untuk mengatasi pengasaman laut memerlukan upaya bersama secara global untuk mengurangi emisi CO₂ dan melindungi ekosistem laut yang rentan dari dampaknya (Delevaux *et al.*, 2024).

Perubahan suhu laut memiliki dampak yang signifikan terhadap biota laut dan ekosistem secara keseluruhan. Peningkatan suhu laut, yang merupakan salah satu hasil dari perubahan iklim global, dapat mengganggu keseimbangan ekosistem laut dan mempengaruhi berbagai spesies laut. Salah satu dampak utama perubahan suhu laut adalah pemindahan dan perubahan distribusi geografis spesies laut. Beberapa

spesies laut mungkin mengalami migrasi ke perairan yang lebih dingin atau lebih dalam, sedangkan spesies lainnya mungkin terancam punah karena tidak mampu beradaptasi dengan perubahan suhu yang cepat. Peningkatan suhu laut juga dapat mempengaruhi siklus hidup spesies, seperti waktu reproduksi dan pertumbuhan, yang pada gilirannya dapat memengaruhi rantai makanan laut secara keseluruhan. Selain itu, perubahan suhu laut juga dapat memicu pemutihan terumbu karang, yang merupakan ekosistem laut yang sangat penting. Peningkatan suhu air laut dapat menyebabkan alga simbiosis yang hidup di dalam jaringan karang untuk melepaskan diri, yang dapat menyebabkan pemutihan dan kematian karang. Hal ini dapat mengganggu keanekaragaman hayati laut yang tinggi di terumbu karang dan berdampak negatif pada ekosistem pesisir yang bergantung padanya. Selain itu, perubahan suhu laut juga dapat mempengaruhi produktivitas plankton, yang merupakan dasar rantai makanan laut. Perubahan dalam produktivitas plankton dapat memengaruhi populasi ikan dan mamalia laut yang bergantung padanya untuk makanan. Secara keseluruhan, perubahan suhu laut memiliki dampak yang luas dan serius terhadap biota laut dan ekosistem. Untuk mengatasi dampaknya, langkah-langkah mitigasi yang efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca perlu diambil, sementara upaya pelestarian ekosistem laut yang sehat juga penting untuk meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap perubahan suhu laut yang terus meningkat (Arreguin-Sanchez, 2024).

Pergeseran pola arus laut merupakan dampak signifikan dari perubahan iklim global yang dapat memiliki konsekuensi yang luas terhadap distribusi spesies dan produktivitas laut. Pola arus laut memainkan peran penting dalam mendistribusikan nutrisi, suhu, dan oksigen di seluruh samudra, mempengaruhi kehidupan laut dari mikroorganisme hingga hewan besar. Pergeseran pola arus laut dapat mengubah lingkungan hidup spesies laut dengan cara yang kompleks. Misalnya, ketika arus laut yang biasanya membawa air hangat dari khatulistiwa ke daerah-daerah kutub mengalami perubahan, suhu air di wilayah tersebut dapat berubah secara signifikan. Hal ini dapat mempengaruhi distribusi spesies, dengan beberapa spesies mungkin pindah ke daerah-daerah baru yang lebih sesuai dengan kondisi lingkungan baru, sementara yang lain mungkin mengalami penurunan

populasi atau bahkan punah. Selain itu, pergeseran pola arus laut juga dapat memengaruhi produktivitas laut dengan mempengaruhi sirkulasi nutrisi di laut. Arus laut membawa nutrisi dari kedalaman laut ke permukaan, menyediakan makanan untuk plankton dan organisme laut lainnya. Ketika pola arus berubah, distribusi nutrisi dapat terganggu, memengaruhi produktivitas plankton dan, akibatnya, rantai makanan laut secara keseluruhan (Eiting & Smith, 2007). Pergeseran pola arus laut juga dapat mempengaruhi kondisi lingkungan fisik di wilayah pesisir, seperti pola pasang-surut dan erosi pantai. Perubahan ini dapat berdampak pada ekosistem pesisir yang penting, termasuk hutan bakau dan padang lamun, serta masyarakat yang bergantung pada sumber daya laut untuk kehidupan mereka. Untuk mengurangi dampak pergeseran pola arus laut dan memitigasi konsekuensinya, pemahaman yang mendalam tentang dinamika lautan dan perubahan iklim global sangat penting. Upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca perlu ditingkatkan, sementara pengelolaan ekosistem laut yang adaptif dan responsif juga diperlukan untuk melindungi keanekaragaman hayati laut dan mendukung keberlanjutan ekosistem laut di masa depan.

10.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ekosistem Ruang Laut

Gangguan keseimbangan ekosistem terumbu karang adalah dampak serius dari berbagai faktor, termasuk perubahan iklim, polusi, overfishing, dan aktivitas manusia lainnya. Terumbu karang adalah ekosistem yang sangat sensitif dan rentan, terdiri dari koloni-koloni karang yang hidup bersama dengan beragam organisme laut lainnya. Salah satu gangguan utama terhadap keseimbangan ekosistem terumbu karang adalah pemutihan karang. Peningkatan suhu air laut yang disebabkan oleh perubahan iklim dapat menyebabkan alga simbiosis yang hidup di dalam jaringan karang untuk melepaskan diri, yang menyebabkan karang kehilangan warna dan kemampuan untuk bertahan hidup. Pemutihan karang dapat mengancam keanekaragaman hayati dan keberlanjutan ekosistem terumbu karang. Selain itu, polusi dari limbah industri, pertanian, dan pembangunan pesisir dapat mengotori perairan dan mengganggu keseimbangan ekosistem terumbu karang. Peningkatan kadar nutrisi dalam air laut dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan, yang dapat menghalangi sinar matahari dan mengganggu

pertumbuhan karang. Selain itu, limbah kimia dan polutan lainnya dapat meracuni organisme karang dan mengganggu ekosistem pesisir secara keseluruhan. *Overfishing* juga merupakan ancaman serius terhadap keseimbangan ekosistem terumbu karang. Pemangsaan berlebihan terhadap ikan-ikan herbivora yang penting untuk menjaga pertumbuhan alga dan memelihara keseimbangan ekosistem laut dapat menyebabkan perubahan dramatis dalam komposisi spesies dan struktur ekosistem terumbu karang. Untuk mengatasi gangguan keseimbangan ekosistem terumbu karang, perlindungan dan pelestarian ekosistem yang kokoh diperlukan. Langkah-langkah meliputi pengurangan emisi gas rumah kaca untuk mengurangi pemutihan karang, pengelolaan limbah dan polusi, serta penerapan praktik perikanan yang berkelanjutan untuk mencegah overfishing. Selain itu, upaya restorasi terumbu karang dan rehabilitasi ekosistem juga dapat membantu memulihkan keseimbangan dan keberlanjutan ekosistem terumbu karang yang penting ini (Chaudhary *et al.*, 2023).

Penurunan keanekaragaman hayati laut merupakan masalah global yang disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk perubahan iklim, aktivitas manusia, degradasi habitat, dan polusi laut. Keanekaragaman hayati laut sangat penting untuk keseimbangan ekosistem laut dan berbagai layanan ekosistem yang diberikan kepada manusia. Salah satu penyebab utama penurunan keanekaragaman hayati laut adalah perubahan iklim global. Peningkatan suhu laut, pengasaman laut, dan pergeseran pola arus laut dapat menyebabkan pemutihan karang, migrasi spesies, dan penurunan populasi organisme laut tertentu. Hal ini dapat mengurangi keanekaragaman spesies laut dan memengaruhi rantai makanan laut secara keseluruhan. Selain itu, aktivitas manusia seperti overfishing, penangkapan ikan yang tidak berkelanjutan, dan destruksi habitat seperti penggundulan hutan bakau dan pengeboman terumbu karang juga menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati laut. Penurunan populasi spesies tertentu dapat mengganggu keseimbangan ekosistem laut dan mengancam keberlanjutan sumber daya laut yang penting bagi kehidupan manusia. Polusi laut juga merupakan ancaman serius terhadap keanekaragaman hayati laut. Limbah industri, pertanian, dan limbah domestik dapat mencemari perairan laut dan meracuni organisme laut, menyebabkan penurunan populasi dan kerusakan

habitat. Untuk mengatasi penurunan keanekaragaman hayati laut, langkah-langkah pelestarian dan perlindungan ekosistem laut yang kokoh sangat penting. Ini termasuk pengelolaan perikanan yang berkelanjutan, pembentukan kawasan konservasi laut yang luas, dan penegakan hukum yang ketat terhadap praktik-praktik illegal fishing dan destruksi habitat laut. Selain itu, upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperbaiki kualitas air laut juga penting untuk menjaga keanekaragaman hayati laut dan keberlanjutan ekosistem laut secara keseluruhan (Tolochko & Vadrot, 2021).

Peningkatan populasi spesies invasif merupakan ancaman serius bagi keanekaragaman hayati laut dan keseimbangan ekosistem laut. Spesies invasif adalah organisme yang diperkenalkan ke lingkungan baru di luar habitat asalnya, dan dengan cepat menyebar dan mengambil alih ekosistem baru tersebut. Salah satu faktor yang menyebabkan peningkatan populasi spesies invasif adalah aktivitas manusia. Kapal-kapal yang membawa air ballast dari satu wilayah ke wilayah lain dapat membawa bersamaan dengan mereka spesies invasif yang kemudian dapat beradaptasi dan berkembang biak di habitat baru. Selain itu, spesies invasif juga dapat diperkenalkan melalui perdagangan internasional, baik secara sengaja maupun tidak disengaja, seperti ketika spesies eksotis dilepas oleh pembudidaya hewan peliharaan yang tidak bertanggung jawab. Peningkatan populasi spesies invasif dapat memiliki dampak yang merusak pada ekosistem laut. Mereka sering kali bersaing dengan spesies asli untuk sumber daya seperti makanan dan ruang hidup, menyebabkan penurunan populasi spesies asli atau bahkan punahnya spesies tersebut. Selain itu, spesies invasif juga dapat mengubah struktur dan fungsi ekosistem, menyebabkan perubahan dalam rantai makanan laut dan dinamika populasi. Untuk mengatasi peningkatan populasi spesies invasif, langkah-langkah pengendalian dan manajemen yang efektif diperlukan. Ini termasuk pemantauan terhadap spesies invasif yang ada dan upaya untuk membatasi penyebaran mereka, seperti dengan menetapkan kawasan konservasi atau menetapkan peraturan yang melarang penggunaan kapal-kapal dengan air ballast terbuka. Selain itu, kesadaran publik tentang bahaya spesies invasif perlu ditingkatkan, dan upaya-upaya harus dilakukan untuk mempromosikan praktek-praktek

yang mengurangi risiko pengenalan spesies invasif ke lingkungan baru (Pujolar *et al.*, 2023).

Perubahan pola migrasi dan reproduksi biota laut adalah respons langsung terhadap perubahan lingkungan, termasuk perubahan iklim, perubahan suhu laut, perubahan pola arus laut, dan faktor-faktor lainnya. Pola migrasi dan reproduksi biota laut sangat penting dalam menjaga keberlanjutan populasi dan ekosistem laut secara keseluruhan. Perubahan iklim, khususnya peningkatan suhu laut, dapat mempengaruhi pola migrasi biota laut dengan memicu perubahan dalam distribusi geografis spesies. Beberapa spesies mungkin memilih untuk bermigrasi ke perairan yang lebih dingin atau lebih dalam, sementara yang lain mungkin berpindah ke wilayah yang lebih hangat atau lebih dangkal. Perubahan pola migrasi ini dapat memengaruhi rantai makanan laut dan interaksi antar spesies, serta berdampak pada kegiatan perikanan dan aktivitas manusia lainnya yang bergantung pada spesies tersebut. Selain itu, perubahan pola migrasi dan reproduksi biota laut juga dapat mempengaruhi siklus hidup spesies laut. Perubahan suhu laut dan pola arus laut dapat mempengaruhi waktu dan lokasi reproduksi, penetasan telur, dan pertumbuhan larva, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kelangsungan hidup populasi dan keberlanjutan ekosistem. Penting untuk memahami dan memantau perubahan dalam pola migrasi dan reproduksi biota laut, serta memahami konsekuensinya bagi ekosistem laut dan aktivitas manusia yang bergantung padanya. Upaya perlindungan dan pemulihan ekosistem laut yang adaptif dan responsif diperlukan untuk mengatasi perubahan yang terjadi, sementara upaya mitigasi perubahan iklim dan pelestarian habitat laut juga penting untuk mempertahankan keanekaragaman hayati laut dan mendukung keberlanjutan ekosistem laut di masa depan (Yang *et al.*, 2024).

10.4 Dampak Ekonomi dan Sosial Perubahan Iklim di Ruang Laut

Perubahan pola migrasi dan reproduksi biota laut dapat memiliki dampak signifikan terhadap sektor perikanan dan budidaya laut, yang secara langsung bergantung pada kelimpahan dan distribusi spesies laut. Perubahan ini dapat mengganggu operasi perikanan dan mengubah dinamika produksi budidaya laut. Salah satu dampak utama adalah perubahan dalam kelimpahan dan distribusi spesies target perikanan.

Ketika spesies-spesies ini mengubah pola migrasi mereka atau pindah ke perairan yang berbeda karena perubahan suhu atau pola arus laut, ini dapat mempengaruhi hasil tangkapan dan ketersediaan sumber daya bagi nelayan. Penurunan populasi spesies target perikanan dapat mengurangi pendapatan nelayan dan memengaruhi keberlanjutan sektor perikanan secara keseluruhan. Selain itu, perubahan pola migrasi dan reproduksi juga dapat mempengaruhi budidaya laut, seperti peternakan ikan dan budidaya kerang. Perubahan dalam suhu air laut atau pola arus dapat mempengaruhi pertumbuhan dan reproduksi ikan dan invertebrata yang dibudidayakan, yang dapat mengganggu produktivitas budidaya laut. Penyakit dan stres juga dapat meningkat ketika spesies budidaya tidak dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungan yang cepat. Untuk mengatasi dampak perubahan pola migrasi dan reproduksi terhadap sektor perikanan dan budidaya laut, diperlukan manajemen perikanan dan budidaya yang adaptif dan responsif. Ini termasuk pemantauan terus-menerus terhadap perubahan dalam kelimpahan dan distribusi spesies target, serta pengembangan strategi manajemen yang memperhitungkan perubahan lingkungan yang sedang terjadi. Selain itu, diversifikasi sumber daya perikanan dan budidaya laut dan investasi dalam teknologi dan praktik yang berkelanjutan juga penting untuk meningkatkan ketahanan sektor ini terhadap perubahan lingkungan yang tidak terduga (Ruban, 2024).

Perubahan pola migrasi dan reproduksi biota laut dapat menyebabkan gangguan terhadap aktivitas maritim dan pariwisata laut, yang bergantung pada kelimpahan dan keberagaman hayati laut untuk menarik wisatawan dan mempertahankan keberlanjutan industri ini. Salah satu dampak utama adalah penurunan kelimpahan spesies ikonik yang menjadi daya tarik wisatawan, seperti penyu, ikan-ikan besar, dan mamalia laut seperti lumba-lumba dan paus. Perubahan pola migrasi dan reproduksi dapat menyebabkan penurunan populasi atau perpindahan spesies ini dari wilayah-wilayah tertentu, mengurangi kesempatan wisatawan untuk mengamati spesies-spesies tersebut di alam liar. Selain itu, perubahan dalam kelimpahan dan distribusi spesies laut juga dapat mengganggu aktivitas perikanan dan penggemar olahraga air. Nelayan dan penggemar olahraga air seperti pemancing mungkin menghadapi kesulitan menemukan dan menangkap ikan atau hewan laut lainnya

karena perubahan pola migrasi dan distribusi spesies target mereka. Gangguan terhadap aktivitas maritim dan pariwisata laut juga dapat disebabkan oleh kerusakan ekosistem laut yang penting, seperti terumbu karang yang mati atau kawasan pesisir yang tercemar. Penyusutan terumbu karang yang disebabkan oleh pemutihan karang atau degradasi habitat dapat mengurangi daya tarik destinasi wisata dan mengganggu keberlanjutan pariwisata laut di wilayah-wilayah tersebut. Untuk mengatasi gangguan ini, manajemen pariwisata laut yang berkelanjutan dan adaptif sangat penting. Ini termasuk pemantauan terus-menerus terhadap perubahan dalam kelimpahan dan distribusi spesies laut, serta pengembangan alternatif untuk meningkatkan keberagaman dan daya tarik destinasi wisata laut. Selain itu, perlindungan dan pemulihan ekosistem laut yang penting seperti terumbu karang dan hutan bakau juga diperlukan untuk memastikan keberlanjutan industri pariwisata laut dan aktivitas maritim di masa depan (Yan *et al.*, 2021).

Komunitas pesisir dan pulau kecil rentan terhadap berbagai ancaman, termasuk perubahan lingkungan yang dipicu oleh perubahan iklim dan aktivitas manusia. Beberapa ancaman utama yang dihadapi oleh komunitas pesisir dan pulau kecil (Teniwut *et al.*, 2023), antara lain:

1. Peningkatan tinggi permukaan laut: Perubahan iklim menyebabkan pencairan es dan ekspansi termal air laut, yang berkontribusi pada peningkatan tinggi permukaan laut. Komunitas pesisir dan pulau kecil sering kali berada di garis pantai yang rentan terhadap banjir rob, erosi pantai, dan intrusi air laut ke dalam air tanah, mengancam infrastruktur, rumah tangga, dan mata pencaharian.
2. Pemutihan terumbu karang: Terumbu karang adalah ekosistem laut yang penting bagi komunitas pesisir dan pulau kecil, karena memberikan perlindungan pantai, sumber daya perikanan, dan daya tarik pariwisata. Peningkatan suhu air laut yang disebabkan oleh perubahan iklim dapat menyebabkan pemutihan terumbu karang, mengurangi keanekaragaman hayati dan produktivitas ekosistem.
3. Intensifikasi badai dan cuaca ekstrem: Perubahan iklim juga dapat menyebabkan intensifikasi badai dan cuaca ekstrim, seperti badai tropis yang lebih kuat dan banjir yang lebih sering. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan yang parah pada infrastruktur pesisir, hilangnya properti, dan bahkan kehilangan nyawa.

4. Ketersediaan air bersih: Komunitas pesisir dan pulau kecil sering mengandalkan air tanah sebagai sumber utama air bersih. Peningkatan tinggi permukaan laut dapat menyebabkan intrusi air laut ke dalam air tanah, mencemarnya dengan air asin dan mengurangi ketersediaan air bersih untuk konsumsi manusia dan pertanian.

Untuk mengatasi ancaman ini, diperlukan langkah-langkah adaptasi yang kuat dan berkelanjutan. Ini meliputi pembangunan infrastruktur tangguh yang tahan terhadap bencana alam, pengelolaan pantai yang bijaksana, perlindungan dan restorasi ekosistem pesisir, diversifikasi mata pencaharian, dan upaya untuk meningkatkan ketahanan komunitas pesisir melalui pendidikan, pelatihan, dan kapasitas membangun. Selain itu, upaya mitigasi perubahan iklim juga penting untuk mengurangi dampak jangka panjang perubahan lingkungan pada komunitas pesisir dan pulau kecil.

Perubahan lingkungan yang meliputi perubahan iklim, peningkatan tinggi permukaan laut, dan degradasi ekosistem laut memiliki implikasi signifikan terhadap ketahanan pangan dan mata pencaharian, terutama bagi komunitas pesisir dan pulau kecil yang bergantung pada sumber daya laut untuk penghidupan mereka (*Shah et al., 2024*).

1. Ketersediaan pangan; Perubahan iklim dapat mempengaruhi produktivitas perikanan dan budidaya laut, mengurangi ketersediaan ikan dan hasil laut lainnya yang merupakan sumber utama protein bagi banyak komunitas pesisir. Pemutihan terumbu karang juga dapat mengurangi produktivitas perikanan dan mengganggu rantai makanan laut, yang berdampak pada ketersediaan pangan lokal.
2. Keamanan pangan; Gangguan terhadap produktivitas perikanan dan budidaya laut dapat mengancam keamanan pangan lokal. Komunitas pesisir dan pulau kecil mungkin menghadapi kesulitan memenuhi kebutuhan pangan mereka, terutama saat terjadi bencana alam seperti badai tropis atau banjir rob.
3. Mata pencaharian; Penurunan produktivitas perikanan dan budidaya laut juga dapat mempengaruhi mata pencaharian tradisional seperti nelayan, petani kerang, dan petani ikan. Komunitas pesisir yang bergantung pada sektor perikanan dan pariwisata laut juga mungkin

mengalami penurunan pendapatan dan kerugian ekonomi akibat perubahan lingkungan.

4. Ketahanan ekonomi; Gangguan terhadap sektor perikanan dan pariwisata laut dapat mengurangi ketahanan ekonomi komunitas pesisir dan pulau kecil, meningkatkan kerentanan terhadap kemiskinan dan kerawanan pangan. Hal ini dapat mengakibatkan migrasi paksa, konflik sosial, dan ketidakstabilan politik di wilayah-wilayah tersebut.

Untuk mengatasi implikasi ini, diperlukan upaya bersama untuk meningkatkan ketahanan pangan dan mata pencaharian komunitas pesisir. Langkah-langkah adaptasi seperti diversifikasi mata pencaharian, pengembangan infrastruktur tangguh, pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan, dan akses yang lebih baik terhadap pasar dan teknologi dapat membantu meningkatkan ketahanan ekonomi dan pangan komunitas pesisir. Selain itu, upaya mitigasi perubahan iklim juga diperlukan untuk mengurangi dampak jangka panjang perubahan lingkungan pada ketahanan pangan dan mata pencaharian di wilayah-wilayah ini.

10.5 Upaya Adaptasi dan Mitigasi Dampak Perubahan Iklim di Ruang Laut

Di tengah tantangan yang dihadapi oleh ekosistem laut akibat perubahan iklim dan aktivitas manusia, strategi adaptasi menjadi kunci dalam menjaga ketahanan ekosistem ini. Salah satu langkah penting adalah melalui pembentukan kawasan konservasi laut yang luas dan terlindungi, tempat di mana keanekaragaman hayati laut dapat terjaga dan spesies-spesies yang terancam punah dapat diberikan perlindungan. Selain itu, pengelolaan perikanan yang berkelanjutan juga menjadi fokus utama, dengan menerapkan praktik-praktik seperti penetapan batas tangkapan dan penggunaan alat tangkap yang ramah lingkungan. Upaya restorasi ekosistem laut yang rusak juga menjadi prioritas, dengan melakukan penanaman kembali terumbu karang, rehabilitasi hutan bakau, dan pemulihan habitat laut lainnya. Pentingnya mengelola kualitas air laut juga tidak bisa diabaikan, dengan upaya untuk mengurangi polusi laut dari berbagai sumber. Selain itu, meningkatkan adaptasi terhadap perubahan iklim juga menjadi bagian integral dari

strategi adaptasi, dengan memfasilitasi migrasi spesies laut yang diperlukan dan melindungi habitat yang rentan terhadap dampak perubahan iklim. Pendidikan dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya ekosistem laut juga menjadi kunci, dengan tujuan untuk mempromosikan perilaku yang lebih bertanggung jawab terhadap lingkungan laut. Dan yang tak kalah pentingnya adalah kolaborasi lintas-sektor dan lintas-batas, yang diperlukan untuk merancang dan melaksanakan strategi adaptasi yang efektif dalam menjaga ketahanan ekosistem laut di masa depan (Meng *et al.*, 2024).

Untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memitigasi dampaknya terhadap perubahan iklim, berbagai upaya mitigasi diperlukan di tingkat lokal, nasional, dan global. Salah satu langkah utama adalah beralih ke sumber energi terbarukan, seperti energi surya, angin, dan hidro, yang menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah daripada bahan bakar fosil. Selain itu, meningkatkan efisiensi energi dalam transportasi, industri, dan sektor bangunan juga penting untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca. Upaya-upaya lain termasuk pengurangan deforestasi dan degradasi hutan, serta pengelolaan lahan yang berkelanjutan, yang dapat berperan sebagai penyerap karbon alami. Langkah-langkah ini dapat didukung oleh kebijakan yang mendukung, seperti penetapan target emisi, insentif untuk teknologi hijau, dan regulasi yang mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Selain itu, penting untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya mitigasi perubahan iklim dan mendorong partisipasi aktif dalam upaya-upaya yang mengurangi emisi gas rumah kaca, baik dalam skala individu maupun komunal. Dengan menggabungkan berbagai strategi ini, kita dapat mempercepat transisi menuju ekonomi yang lebih berkelanjutan dan mengurangi dampak perubahan iklim secara signifikan (Steinitz *et al.*, 2024).

Kerjasama internasional dan kebijakan terkait perubahan iklim dan ruang laut merupakan elemen penting dalam upaya menjaga keberlanjutan ekosistem laut di tingkat global. Salah satu kerangka kerja utama adalah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) melalui Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (UNFCCC) dan Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Hukum Laut (UNCLOS). Di bawah UNFCCC, perjanjian penting seperti Protokol

Kyoto dan Persetujuan Paris telah dibuat untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Negara-negara di seluruh dunia bekerja sama dalam pengembangan kebijakan dan strategi mitigasi, serta dalam membangun kapasitas untuk menangani perubahan iklim. Selain itu, kerangka kerja ini juga memfasilitasi pertukaran pengetahuan dan teknologi antar negara. UNCLOS memberikan kerangka hukum internasional untuk pengelolaan dan pelestarian sumber daya laut, termasuk ekosistem laut yang terpengaruh oleh perubahan iklim. Prinsip-prinsip dalam UNCLOS, seperti keberlanjutan pengelolaan sumber daya laut dan kerjasama internasional, menjadi dasar bagi negara-negara untuk bekerja sama dalam menjaga integritas lingkungan laut. Selain itu, terdapat berbagai inisiatif regional dan multilateral lainnya, seperti Kerangka Kerja Kelautan dan Perikanan di Pasifik Barat Daya (WCPF) dan Kemitraan Global untuk Laut dan Lingkungan (GOAL), yang bertujuan untuk meningkatkan kerjasama internasional dalam pengelolaan dan pelestarian lingkungan laut. Kerjasama internasional juga terwujud melalui kemitraan antara pemerintah, LSM, sektor swasta, dan masyarakat sipil dalam mengembangkan dan melaksanakan inisiatif mitigasi dan adaptasi perubahan iklim yang berfokus pada ruang laut. Ini melibatkan pertukaran pengetahuan dan teknologi, serta alokasi sumber daya yang memadai untuk mendukung upaya bersama dalam menjaga keberlanjutan ekosistem laut di masa depan. Dengan kerangka kerja kerjasama internasional dan kebijakan terkait yang kuat, diharapkan dapat tercapai upaya yang lebih efektif dalam menjaga keberlanjutan ruang laut dan mengatasi dampak perubahan iklim bagi ekosistem laut global (Hong Nham *et al.*, 2023).

Peran individu dan masyarakat sangat penting dalam menjaga kelestarian ruang laut, mengingat bahwa upaya konservasi tidak hanya menjadi tanggung jawab pemerintah dan lembaga internasional, tetapi juga merupakan tanggung jawab bersama semua pihak. Berikut adalah beberapa peran yang dapat dimainkan oleh individu dan masyarakat dalam menjaga kelestarian ruang laut:

1. Pendidikan dan Kesadaran: Individu dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan pemahaman dan kesadaran tentang pentingnya ruang laut dan ekosistemnya. Ini dapat dilakukan melalui

kampanye penyuluhan, program pendidikan, dan kegiatan masyarakat yang mempromosikan pengetahuan tentang ekologi laut dan ancaman yang dihadapi oleh lingkungan laut.

2. Pengurangan Limbah: Individu dapat berkontribusi dalam menjaga kebersihan ruang laut dengan mengurangi penggunaan plastik sekali pakai, mendaur ulang limbah, dan mengurangi polusi laut. Tindakan sederhana seperti menghindari penggunaan kantong plastik, menggunakan produk yang ramah lingkungan, dan berpartisipasi dalam kegiatan pembersihan pantai dapat memberikan dampak positif yang signifikan.
3. Konservasi Sumber Daya: Individu dapat berperan dalam konservasi sumber daya laut dengan mempraktikkan penangkapan ikan yang berkelanjutan, memilih untuk mengonsumsi produk perikanan yang dilestarikan, dan mendukung upaya pemeliharaan habitat laut seperti terumbu karang dan hutan bakau.
4. Partisipasi dalam Aksi Sipil: Masyarakat dapat berpartisipasi dalam aksi sipil untuk mendukung kebijakan perlindungan lingkungan laut, seperti mengadvokasi pembentukan kawasan konservasi laut, mendesak pemerintah untuk mengambil tindakan terhadap polusi laut, atau mendukung organisasi nirlaba yang bekerja untuk pelestarian lingkungan laut.
5. Turisme Bertanggung Jawab: Wisatawan dapat memainkan peran penting dalam mempromosikan turisme bertanggung jawab yang menghormati lingkungan laut, seperti memilih penyedia tur yang berkomitmen pada praktik berkelanjutan, menghindari aktivitas wisata yang merusak lingkungan laut, dan mematuhi aturan dan regulasi setempat.
6. Pendanaan dan Dukungan: Individu dan masyarakat juga dapat memberikan dukungan finansial dan sumber daya lainnya kepada organisasi dan proyek yang berfokus pada pelestarian ruang laut, termasuk penelitian ilmiah, rehabilitasi ekosistem, dan pengelolaan konservasi.

Melalui kolaborasi dan upaya bersama antara individu, masyarakat, dan pihak-pihak lainnya, kita dapat memainkan peran yang signifikan dalam menjaga kelestarian ruang laut untuk generasi mendatang.

10.6 Kesimpulan dan Prospek

Perubahan iklim telah memberikan dampak yang signifikan pada ruang laut di seluruh dunia. Pemanasan global telah menyebabkan kenaikan permukaan laut, mengancam pulau-pulau kecil dan pesisir dengan banjir rob, erosi pantai, dan intrusi air laut ke dalam air tanah. Selain itu, peningkatan suhu laut menyebabkan pemutihan terumbu karang, yang mengakibatkan kematian massal terumbu karang dan penurunan keanekaragaman hayati laut. Perubahan suhu laut dan pola arus laut juga memengaruhi pola migrasi dan reproduksi biota laut, mengganggu rantai makanan laut dan mempengaruhi hasil tangkapan perikanan. Selain itu, emisi gas CO₂ yang tinggi juga menyebabkan pengasaman laut, mengancam organisme laut yang membutuhkan kalsium karbonat untuk membangun kerangka atau cangkang. Secara keseluruhan, perubahan iklim telah mengubah ekosistem laut secara drastis, mengancam keberlanjutan lingkungan laut dan sumber daya yang bergantung padanya.

Pentingnya upaya adaptasi dan mitigasi dalam menghadapi perubahan iklim tidak bisa dipandang sebelah mata. Adaptasi diperlukan untuk mengurangi kerentanan kita terhadap dampak yang sudah tidak terhindarkan, sementara mitigasi diperlukan untuk mengurangi dampak buruk perubahan iklim di masa depan. Upaya adaptasi melibatkan langkah-langkah seperti membangun infrastruktur tangguh, memperkuat sistem peringatan dini, dan mengembangkan strategi pertanian yang adaptif. Sementara itu, upaya mitigasi melibatkan langkah-langkah seperti mengurangi emisi gas rumah kaca, mempromosikan energi terbarukan, dan meningkatkan efisiensi energi. Keduanya saling terkait dan sama-sama penting dalam mengatasi tantangan perubahan iklim. Tanpa upaya adaptasi, kita akan terus menderita dampak yang sudah ada, sementara tanpa mitigasi, dampak buruk perubahan iklim akan terus meningkat. Oleh karena itu, perlu adanya komitmen global dan aksi kolektif dari semua pihak untuk menjalankan kedua jenis upaya ini secara serius, demi menjaga keberlanjutan planet kita dan meningkatkan ketahanan kita terhadap perubahan iklim yang sudah terjadi dan yang akan datang.

Pandangan ke depan untuk pengelolaan ruang laut yang berkelanjutan di era perubahan iklim membutuhkan pendekatan yang holistik dan adaptif. Pengelolaan tersebut harus mampu beradaptasi dengan perubahan iklim yang sedang terjadi dan yang diantisipasi di masa depan, dengan mengidentifikasi area-area yang rentan dan mengembangkan strategi untuk meminimalkan dampaknya. Penting juga untuk melindungi dan memulihkan ekosistem laut yang penting, seperti terumbu karang, hutan bakau, dan padang lamun, dengan memperkuat upaya konservasi dan pemulihan. Pengelolaan perikanan yang berkelanjutan menjadi semakin penting, dengan memperhitungkan pergeseran pola migrasi spesies dan dampaknya terhadap populasi ikan. Kolaborasi internasional dan kesadaran masyarakat juga menjadi kunci, dengan memperkuat kerjasama lintas-batas dan lintas-sektor serta meningkatkan pemahaman tentang pentingnya ruang laut dan ancaman yang dihadapinya akibat perubahan iklim. Dengan mengadopsi pendekatan ini, diharapkan pengelolaan ruang laut dapat meningkatkan ketahanan ekosistem laut dan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim secara keseluruhan.

Bab 11

PENCEMARAN LAUT: SUMBER, DAMPAK DAN PENANGGULANGANNYA

11.1 Definisi dan Sumber Pencemaran Laut

11.1.1 Definisi Pencemaran Laut

Secara alami, laut mempunyai kemampuan dalam meminimalkan dampak dari zat asing yang berpotensi mencemari lingkungan di dalamnya. tetapi, apabila jumlah zat pencemar itu melampaui batas toleransi serta melebihi kekuatan dan daya laut untuk *recovery* secara alami maka ini akan mengakibatkan terjadinya polusi lingkungan laut.

Pencemaran laut terjadi ketika bahan-bahan buatan manusia, baik disengaja maupun tidak, masuk ke dalam ekosistem laut karena penanganan yang buruk atau pembuangan langsung ke laut. Kejadian alamiah seperti bencana alam juga dapat menjadi penyebab pencemaran laut. Pencemaran laut dapat dibagi menjadi 3 kategori, yaitu yang disengaja (*Voluntary Discharge*) dan yang tidak disengaja (*Unvoluntary Discharge*). Pencemaran yang disengaja terjadi ketika bahan-bahan bekas seperti sisa pencucian tangki atau pembersihan tangki muatan kapal tanker dibuang ke laut secara sengaja. Pencemaran yang tidak disengaja dapat terjadi akibat tabrakan kapal, kapal terdampar, atau kebocoran pada instalasi eksplorasi minyak di area pantai (Danamik, 2018).

Selanjutnya menurut IMO (1987) *dalam* (Lucky, 2021) bahwa batasan pencemaran laut dapat dilihat sebagai berikut: “*Marine pollution has been defined as the introduction by man, directly or indirectly of substance or energi into the marine environment (including estuaries) resulting in such deleterious effect to marine activities, including fishing, impairment quality of sea water and reduction of amenities*”. Bertolak darai pengertian tersebut, awalnya harus ada bahan atau energi yang manusia masukkan ke

lingkungan laut, baik secara langsung maupun tidak langsung. Introduksi ini menghasilkan dampak negatif, merusak sumber daya hayati, berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia, dan mengganggu aktivitas di laut.

11.1.2 Sumber Pencemaran Laut

11.1.2.1 Aktivitas Industri

Limbah industri juga merupakan satu diantara beberapa sumber pencemaran laut yang utama di berbagai wilayah perairan laut. Kualitas limbah industri seringkali masih melebihi standar yang telah ditetapkan meskipun telah melewati proses pengolahan. Hal ini menyebabkan masalah lingkungan yang sering muncul di daerah-daerah industri. Sebagian dari limbah ini bahkan bisa langsung beracun bagi kehidupan perairan, seperti *cyanida*, *phenol*, *sodium pentachlorophenate*, atau berdampak tidak langsung dengan mengurangi oksigen terlarut yang diperlukan untuk dekomposisi bahan organik. Beberapa zat juga bisa mengalami bioakumulasi, menyebabkan masalah yang berlangsung dalam jangka waktu lama.

Industri pertambangan sendiri dianggap tidak berkelanjutan karena mengandalkan sumber daya yang terbatas. Tata kelola lingkungan dalam segala aktifitas pertambangan sepatutnya mencakup seluruh tahapan kegiatan, dari eksplorasi hingga pasca penutupan tambang. Namun, di Indonesia, banyak perusahaan pertambangan yang tampaknya tidak tunduk pada regulasi lingkungan dan melakukan pencemaran tanpa rasa takut akan sanksi. Praktik-praktik seperti pembuangan limbah tambang secara primitif ke sungai, danau, atau laut juga menjadi permasalahan serius dalam konteks ini (Santosa, 2013).

Industri pertambangan yang beroperasi di wilayah pesisir Pantai dan laut dan menghasilkan limbah logam berat merupakan salah satu yang menyebabkan pencemaran perairan. Menurut Bryan (1976) setidaknya ada 18 unsur logam yang terkait dengan masalah pencemaran air, meskipun beberapa di antaranya penting sebagai nutrisi bagi organisme, karenanya beberapa peneliti, antar lain Clark (1992), Manahan (1992), Rainbow dan Dallinger (1993), dan Kennish (1997), mengelompokkan logam berat menjadi dua, yaitu (a) logam-logam yang esensial bagi metabolisme organisme pada konsentrasi rendah, tetapi

mungkin beracun pada konsentrasi tinggi, misalnya *Chromium* (Gr), *Copper* (Cu), *Cobalt* (Co), *Iron* (Fe), *Manganese* (Mn), *Molybdenum* (Mo), *Zinc* (Zn), *Magnesium* (Mg), *Nickel* (Ni), dan mungkin masih ada lainnya; dan (b) logam-logam yang tidak dibutuhkan dalam fungsi metabolisme (*metalloids*), tetapi beracun walaupun pada konsentrasi rendah, misalnya *Arsenic* (As), *Cadmium* (Cd), *Lead* (Pb), *Mercury* (Hg), *Selenium* (Se), dan *Tin* (Sn) (Tabel 11.1). Logam-logam, yang tergolong *metalloids*, ini bersifat *toxic* dan dapat mengganggu kerja enzim dengan membentuk "*mercaptides*" dengan kelompok "*sulphydril*", yang bertanggung jawab pada aktivitas katalitik (Supriharyono, 2007).

Tabel 11.1 Berbagai jenis logam dan konsentrasi rata-rata yang terkandung dalam air laut

No.	Jenis logam berat	Konsentrasi (mg/l)	No.	Jenis logam berat	Konsentrasi (mg/l)
1	Alluminium (Al)	1-5	10	Manganese (Mn)	0,2-2
2	Antimony (Sb)	0,2-0,21	11	Mercury (Hg)	0,011-0,05
3	Arsenic (As)	2,1-2,3	12	Molybdenum (Mo)	10
4	Cadmium (Cd)	0,01-0,07	13	Nickel (Ni)	0,2-2
5	Chromium (Cr)	0,08-0,06	14	Selenium (Se)	0,04-0,45
6	Cobalt (Co)	0,02-0,04	15	Silver (Ag)	0,01-0,1
7	Copper (Cu)	0,04-3	16	Tin (Sn)	0,01
8	Iron (Fe)	1,3-3	17	Vanadium (V)	1,5-1,9
9	Lead (Pb)	0,005-0,03	18	Zinc (Zn)	0,01-5

(Sumber : Supriharyono, 2007)

Adapun sumber pencemar logam berat di perairan laut dapat dibedakan menjadi dua, yaitu sumber yang bersifat alami dan sumber yang bersifat buatan. Logam berat yang masuk ke perairan laut secara alami berasal dari tiga sumber utama:

- (a) masukan dari daerah pantai, yang meliputi sungai-sungai dan hasil abrasi oleh aktivitas gelombang;
- (b) masukan dari laut dalam, yang melibatkan logam-logam yang berasal dari aktivitas gunung berapi di laut yang dalam dan logam-logam yang terbawa oleh partikel atau sedimen melalui proses kimia; dan
- (c) masukan dari lingkungan dekat pantai.

11.1.2.2 Aktivitas Perkapalan

Kegiatan pelayaran dapat mengakibatkan pencemaran laut melalui tumpahan minyak yang berasal dari operasional kapal. Tumpahan minyak ini bisa disebabkan oleh aktivitas rutin maupun kecelakaan. Tumpahan dari aktivitas rutin sering terjadi karena kegiatan seperti pembuangan sisa pencucian tangki, pembuangan limbah, pembuangan air bekas, dan tumpahan saat proses bongkar muat. Di sisi lain, tumpahan akibat kecelakaan kapal terjadi karena insiden yang tidak terduga dan dapat menyebabkan kerugian materiil maupun korban jiwa. Meskipun insiden tumpahan minyak jarang terjadi, dampaknya bisa sangat besar dan menjadi bencana yang mengakibatkan pencemaran laut.

Menurut Widodo dan Wahyuni (2020), pencemaran laut akibat tumpahan minyak dapat dibagi menjadi tiga kategori: (i) Kategori kecil, di mana tumpahan minyak kurang dari 7 ton dapat menyebabkan pencemaran; (ii) Kategori medium, yaitu tumpahan antara 7 ton hingga 700 ton minyak yang dapat menyebabkan pencemaran; dan (iii) Kategori besar, di mana tumpahan minyak lebih dari 700 ton dapat menyebabkan pencemaran.

Kecelakaan atau tumpahan minyak di laut dapat mengakibatkan perubahan dalam sifat fisik dan kimia air laut, yang pada gilirannya memengaruhi kehidupan organisme di dalamnya, termasuk plankton, benthos, dan nekton. Selain itu, tumpahan minyak juga dapat mengubah nilai estetika laut. Data di bawah ini sebagai kasus kecelakaan kapal di laut, yang terjadi di perairan Indonesia, maupun di dunia (Tabel 11.2) sejak tahun 90-an, yaitu sebagai berikut:

- Tahun 1992 di Selat Malaka: Tabrakan kapal MT Ocean Blessing dengan MT Nagasaki Spririt (25.000 ton minyak mentah tumpah).
- Tahun 1994 di Cilacap: Kapal Tanker Maersk Navigator pemuat minyak mentah karam.
- Tahun 1996 di Natuna: Tabrakan antara Kapal Ikan dengan Kapal Tanker MV. Bandar Ayu.
- Tahun 1997 di Kepulauan Riau: Tenggelamnya Kapal memuat MFO (KM Batamas II).
- Tahun 1997 di Kepulauan Riau: Tabrakan Kapal Tanker Orapin Global vs Evoikos (25.000 ton minyak mentah tumpah).

- Tahun 1997 di Selat Makasar: Pipa transfer minyak pada CALTEX bocor.
- Tahun 1997 di Selat Makasar: Kapal Tanker Mission Viking tenggelam.
- Tahun 1997 di Selat Madura: Kandasnya platform E-20 UNCOAL.
- Tahun 1998, Tanjung Priok: Tenggelamnya Tanker SETDCO.
- Tahun 1999, Cilacap: Kandasnya kapal Pertamina Supply No. 27 dengan muatan solar.
- Tahun 2000 di Cilacap: Pencemaran di Teluk Cilacap sepanjang 38 Km akibat tumpahan 640.000 liter minyak di Tanker MT. King Fisher.
- Tahun 2000, Batam: Tenggelamnya KM. HHC yang memuat 9000 m³ aspal curah.
- Tahun 2001, Tegal-Cirebon: Kandasnya MT. natuna Sea yang menumpahkan 4000 ton minyak.
- Tahun 2002, perairan Singapura: Tenggelamnya Tanker Steadfast yang mengangkut 1200 ton minyak.
- Tahun 2003 di Sungai Musi: Tabrakan Tanker Singapura Agate dan Kapal Petikemas Tian Yu mencemari Bintan dan 4 kecamatan di Pulau Batam.
- Tahun 2004, Riau: Tabrakan Kapal Beras milik PT Toba Pulp Lestari Angiang Shipping dengan Tongkang PLTU 1 Toba yang mengakibatkan tumpahnya 250 ton minyak bahan bakar diesel milik PLTU Keramasan.
- Tahun 2008, Indramayu: Tenggelamnya Tanker Vista Marine yang menumpahkan 200 ton minyak mentah.
- Tahun 2008, Selat Malaka: Tanker Arendal mengalami kebocoran pipa dan menumpahkan 150 ribu DWT minyak.
- Tahun 2009, Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya: Tanker Ageis Leader kandas dan menumpahkan 550 ton minyak mentah, Terbaliknya Tanker MT Kharisma Selatan yang menumpahkan 500 kiloliter MFO (Marine Fuel Oil).
- Tahun 2009, Laut Timor: Ladang minyak Motara meledak dan menumpahkan sekitar 500 ribu liter minyak mentah ke laut setiap hari.

Tabel 11.2 Beberapa kasus tumpahan minyak di perairan dunia

Lokasi	Nama Kapal	Jumlah Tumpahan Minyak (ton)	Tahun
700 NM off Angola	ABT Summer	260,000	1991
Geoa, Italy	Haven	144,000	1991
Off Maputo, Mozambique	Katina P	67,000	1992
La Coruna, Spain	Aegean Sea	74,000	1992
Shetland Island, UK	Braer	85,000	1993
Milford Haven, UK	Sea Empress	72,000	1996
Off Galicia, Spain	Prestige	63,000	2002
South Korea	Hebei Spirit	11,000	2007
Off Shanghai, China	Sanchi	113,000	2018

(Sumber: Galieriková & Materna, 2020)

11.1.2.3 Aktivitas Perikanan

Dalam upaya manusia mengeksploitasi sumberdaya alam khususnya pada sektor penangkapan ikan masih saja dihiasi dengan berbagai aksi unregulated dan tidak ramah lingkungan, seperti penggunaan bahan peledak dalam penangkapan ikan dan racun (KCN) sehingga menyebabkan terjadinya pencemaran laut. Metode atau cara penangkapan ikan dengan menggunakan racun sianida, pengemboman pada kenyataan masih terjadi sampai saat ini oleh karena kurangnya pemahaman dari para nelayan akan dampak yang ditimbulkan dari kegiatan-kegiatan tersebut terhadap ekosistem perairan. Di samping itu, masih banyak praktik-praktik lainnya, yang menyebabkan semakin rusaknya ekosistem terumbu karang, misalnya pengambilan karang untuk berbagai tujuan komersil dan aktivitas-aktivitas lainnya baik yang ada di daratan maupun di laut, seperti pengundulan hutan, industrilisasi, Pelabuhan, pertambangan, pelayaran, dan prawisata, dapat membahayakan ekosistem wilayah pesisir sehingga menjadikan aktivitas-aktivitas manusia, yang diperkirakan dapat merusak ekosistem terumbu karang. Aktivitas-aktivitas ini dalam pelaksanaannya dapat

mempengaruhi kelimpahan karang, serta ikan dan hewan-hewan lainnya, yang hidup di ekosistem tersebut.

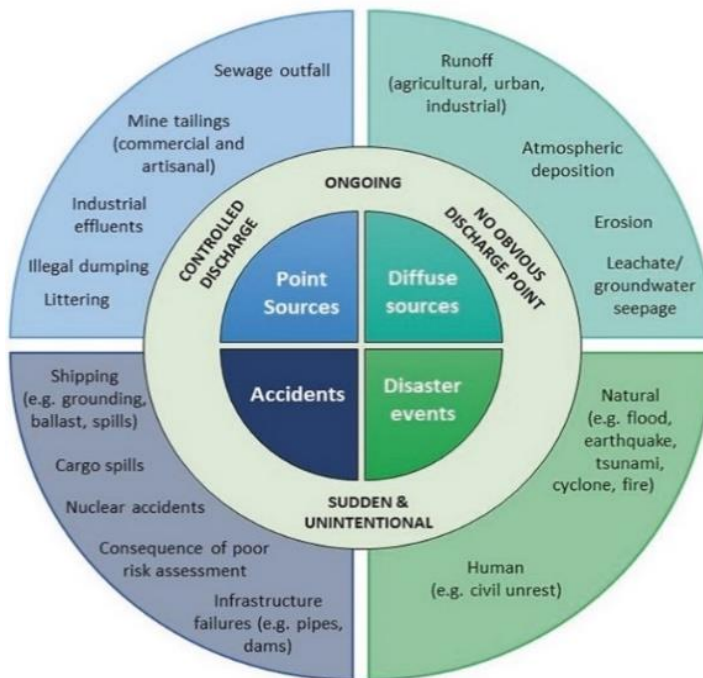
Penggunaan alat tangkap dengan bahan peledak merupakan teknik penangkapan yang paling berbahaya (Tabel 11.3), baik hewan maupun substrat karang hancur, termasuk koloni alga juga rusak. Penggunaan bahan beracun (KCN) untuk menangkap ikan hidup terutama ikan konsumsi, seperti ikan napoleon, kerapu, dan udang barong menjadi masalah besar pada system terumbu karang (Supriharyono, 2007).

Tabel 11.3 Beberapa contoh aktivitas perikanan yang menyebabkan pencemaran laut dan kerusakan ekosistem terumbu karang

Jenis Aktivitas Perusakan Karang Karena Aktivitas Penangkapan Ikan	Dampak		Kejadian
	Jangka Panjang	Jangka Pendek	
• Penggunaa bahan peledak	Rusak	Rusak	Tinggi
• Penggunaan racun (KCN)	Kerusakan nyata	Rusak	Tinggi
• Jarring <i>purse seine</i>		Kerusakan lokal	Rendah
• Pukat harimau, dsb		Reef flat rusak	Kep. Riau
• Jarring insang (<i>gill net</i>)		Kerusakan lokal	Jika penangkapan berlebihan
• Penangkapan ikan hias		Reef flat rusak	Jika tidak ada aturan
• Mengijak karang	Kerusakan nyata	Kerusakan lokal	Dekat dengan pedesaan
• Pengumpulan kerang, misalnya kimia, susu bundar (<i>trochus</i>)		Kerusakan bervariasi	Kerang lenyap

(Sumber: Supriharyono, 2007)

Salah satu kegiatan perikanan lainnya yang menyebabkan terjadinya perairan pencemaran laut, yaitu akuakultur. Menurut Pan, (2023), akuakultur adalah industri yang membudidayakan organisme laut untuk konsumsi manusia dan merupakan penggunaan pertanian di laut. Peternakan ikan telah ditemukan sebagai sumber polusi di perairan setempat, dengan ribuan ikan terkonsentrasi di jaring terbuka, menghasilkan kotoran dalam jumlah besar. Kotoran ini tenggelam ke dasar laut bersama dengan makanan yang tidak dimakan ikan, sehingga mempengaruhi lingkungan, mencemari air dan menyebabkan pertumbuhan tanaman dan hewan yang berlebihan di dasar laut. "Di daerah-daerah seperti Amerika Selatan, penyalahgunaan antibiotik untuk mempertahankan hasil panen telah menyebabkan peningkatan resistensi bakteri yang signifikan, yang bertahan dalam organisme yang ditenakkan, sehingga membahayakan organisme yang ditenakkan dan manusia yang memakannya. Dalam pertanian tradisional di Asia Tenggara, petani cenderung menggunakan pestisida dalam jumlah besar pada tanaman yang berakar di air, seperti padi. Pertanian ini dapat berakhir di lautan saat air mengalir melalui sawah. Bahan kimia yang terkandung dalam pestisida yang masuk ke laut dapat menyebabkan pertumbuhan berlebih pada tanaman dan hewan yang ada di bawah air, sehingga menyebabkan kerusakan pada kehidupan laut. Menurut Reichelt-Brushett (2023), secara global kegiatan atau aktivitas manusia yang menyebabkan terjadinya pencemaran laut sebagaimana terlihat pada gambar di bawah **Gambar 11.1**.



Gambar 11.1 Beberapa Sumber Utama Terjadinya Pencemaran Laut
(Sumber: Reichelt-Brushett, 2023)

11.2 Dampak Pencemaran Laut dan Penanggulangannya

11.2.1 Dampak Pencemaran Laut

Dampak atau akibat terjadinya pencemaran laut akan mempengaruhi kestabilan ekosistem sumberdaya pesisir dan laut, yaitu sebagai berikut:

a. Dampak lethal (kematian)

Tumpahan minyak di area pesisir pantai yang masuk dalam golongan bahan-bahan berbahaya dan beracun seringkali dipicu oleh terjadinya aktifitas area *off-shore*, kecelakaan kapal-kapal tanker, maupun akibat rembesan secara alami minyak bumi dari dasar lautan (*oil seep*). Sejauh ini, belum terdapat laporan tentang aktifitas industri di darat yang langsung membuang limbahnya ke perairan oseanik. Dalam kasus tumpahan minyak di perairan terbuka, konsentrasi minyak di bawah lapisan minyak biasanya sangat rendah, maksimum hanya sekitar 0.1 ppm dan tidak berpotensi menyebabkan kematian serentak (massal) pada organisme, khususnya ikan,

dampak dari tumpahan minyak di area perairan lepas pantai. Namun, sebagian besar kasus tumpahan minyak terjadi di perairan pantai atau perairan dalam (*inshore*). Pada kecelakaan kapal tanker Amono Cadiz tahun 1978 di Perairan Inggris dan Perancis, terjadi kematian massal pada populasi ikan *Pleurenectes platessa* dan *Solea vulgaris*. Risiko kematian massal akan semakin besar bagi ikan di tambak atau keramba, serta jenis kerang yang sulit bermigrasi untuk menghindari tumpahan minyak (Davis *et al.*, 1984).

b. Dampak sublethal

Dampak sublethal dari pencemaran minyak lebih baik dibuktikan melalui uji laboratorium daripada di lapangan, yang mana dampak lethalnya lebih mudah diukur. Penelitian di laboratorium menunjukkan bahwa konsentrasi minyak dalam air dapat mempengaruhi reproduksi dan perilaku ikan serta kerang-kerangan. Kemampuan telur untuk menetas, tingkat kelangsungan hidup, jumlah larva yang cacat, dan proses penutupan cangkang kerang-kerangan sangat dipengaruhi secara signifikan oleh tumpahan minyak meskipun dengan konsentrasi minyak yang relatif rendah (< 0,1 ppm). Banyak jenis udang dan kepiting memiliki sistem penciuman yang sensitif untuk mengatur aktivitas mereka, sehingga paparan bahan berbahaya menyebabkan gangguan pada perilaku seperti kemampuan mencari makanan, memangsa, dan berkembang biak (GESAMP, 1993) *dalam* (Sulistyono, 2013b).

c. Dampak terhadap plankton

Stadium planktonik dari telur dan larva ikan, moluska, dan crustacea sangat rentan terhadap paparan langsung dari bahan berbahaya. Dalam kasus ekstrem seperti tumpahan minyak yang terjadi selama Perang Teluk (1991-1992), terjadi penurunan sebesar 75% pada populasi udang. Situasi ini akan menjadi lebih buruk jika tumpahan minyak terjadi selama periode pemijahan dan di daerah yang merupakan tempat asuhan (*nursery ground*). Dampak pada stadium planktonik dari organisme juga akan meningkat ketika periode pemijahan bersamaan dengan masuknya spesies invasif ke daerah yang tertutup atau semi tertutup seperti teluk yang tercemar (Sulistyono, 2013b).

d. Dampak terhadap ikan migrasi

Secara umum, ikan memiliki kemampuan untuk menghindari bahan pencemar, sehingga dampak jangka panjang terhadap populasi lokal dapat diminimalkan. Namun, beberapa jenis ikan yang bersifat teritorial mungkin harus kembali ke daerah asal mereka untuk mencari makanan dan berkembang biak, meskipun daerah tersebut terkontaminasi oleh bahan berbahaya. Hal ini dapat meningkatkan risiko bagi ikan yang melakukan migrasi (Sulistyono, 2013b).

e. Dampak langsung terhadap kegiatan perikanan

1. *Tainting* (bau atau rasa tidak enak) dapat terjadi pada ikan yang dipelihara di keramba dan tambak, serta pada kerang-kerangan yang tidak dapat bergerak untuk menjauhi bahan pencemar. Organisme yang terkena B3 seperti minyak dapat menghasilkan bau dan rasa yang tidak enak, serta mengalami perubahan warna pada jaringannya sehingga tidak layak untuk dijual. Spesies dengan kandungan lemak tinggi cenderung lebih mudah terkena *tainting* dibandingkan dengan spesies yang lebih kurus. Proses metabolisme (depurasi) akan menghilangkan bau dan rasa tidak enak pada organisme tercemar, namun kecepatan depurasi dapat bervariasi tergantung pada jenis limbah, spesies organisme, dan kondisi lingkungan hidup optimal bagi spesies tersebut (Baker *et al.*, 1990).
2. *Spill* kecil seperti 50 ton dapat memiliki dampak besar pada kegiatan budidaya. Organisme yang dibudidayakan dapat terkena dampak langsung, dan peralatan seperti jaring dan temali juga dapat rusak sehingga tidak dapat digunakan lagi. Selain itu, stok budidaya juga dapat terpengaruh jika intake air laut yang digunakan untuk menyuplai kebutuhan stok terkena dampak *spillage* (Sulistyono, 2013b).
3. Ekosistem pesisir dan laut, seperti mangrove, delta sungai, estuari, padang lamun, dan terumbu karang, memiliki peran yang sangat penting secara ekologis, ekonomis, dan sosial budaya. Secara ekologis, ekosistem ini berfungsi sebagai area pembiakan, habitat, dan sumber makanan bagi berbagai organisme dewasa, serta menyediakan nutrisi (seperti nutrisi dari daun-daun yang gugur) untuk ekosistem dan habitat lain di sekitarnya. Masuknya limbah berbahaya dan beracun (B3) dapat mengganggu fungsi dari sistem-

sistem ekologis tersebut, terutama karena tingkat kerentanannya yang tinggi terhadap bahan beracun. Selain itu, proses alami untuk menghilangkan pencemaran (dispersi dan pelarutan) pada beberapa ekosistem seperti mangrove, estuari, padang lamun, dan daerah pantai dangkal cenderung lebih lambat (IUNC, 1993) *dalam* (Sulistiyono, 2013a).

11.2.2 Penanggulangan Pencemaran Laut

Dalam upaya untuk mencapai hasil yang optimal dalam mencegah dan mengendalikan pencemaran laut, kita perlu menerapkan kontrol yang ketat terhadap emisi polutan. Laut bukanlah milik negara atau wilayah tertentu, sehingga perbedaan standar dan upaya penegakan hukum antar negara seringkali membuat penegakan hukum lingkungan laut menjadi tantangan. Jika kita ingin memperkuat pengelolaan laut, kita harus menyatukan kekuatan penegakan hukum dan meningkatkan upaya penegakan hukum. Pertama, disarankan bahwa dalam mekanisme pencegahan dan pengendalian terpadu lintas wilayah dan lintas sektoral laut dan darat, tanggung jawab dan tugas masing-masing departemen harus diperjelas, rencana kerja dan program implementasi yang terperinci harus dirumuskan, dan mekanisme komunikasi dan koordinasi yang efektif harus ditetapkan.

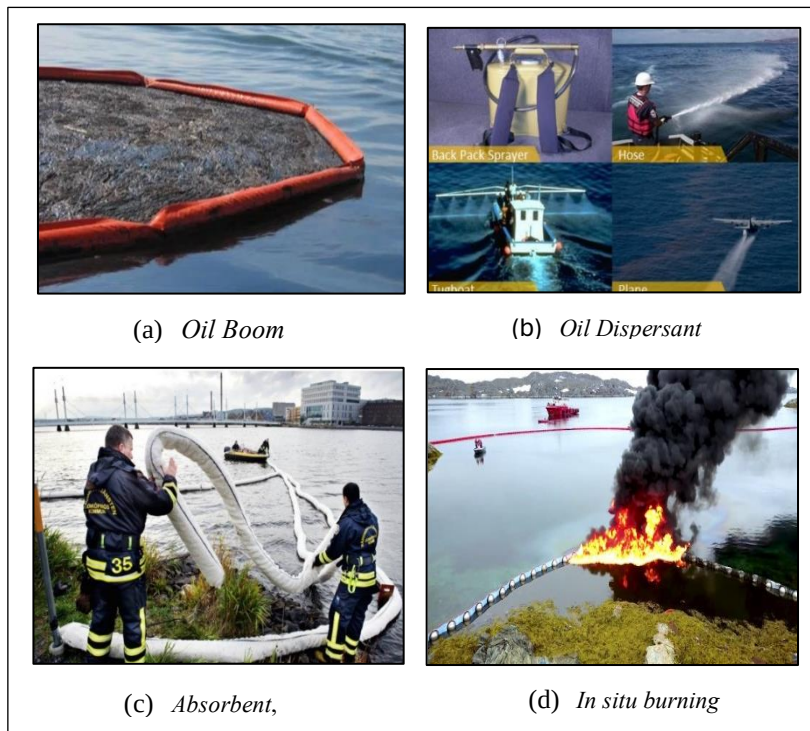
Seiring waktu, perlu ada peningkatan dalam pengawasan dan evaluasi terhadap tugas perlindungan lingkungan laut untuk mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah secara tepat waktu, sehingga memastikan kelancaran pelaksanaan tugas tersebut. Selanjutnya, disarankan untuk memperkuat pelatihan dan spesialisasi bagi aparat penegak hukum dalam membentuk tim penegakan hukum lingkungan laut, guna meningkatkan tingkat dan kemampuan penegakan hukum. Sementara itu, pengawasan dan evaluasi terhadap penegakan hukum juga harus ditingkatkan untuk memastikan legalitas dan efektivitas tindakan penegakan hukum. Selain itu, disarankan agar lembaga perlindungan lingkungan setempat meningkatkan tanggung jawab dan upaya mereka, serta diberikan peran penuh dalam pengelolaan lingkungan laut. Dalam pekerjaan khusus, kita harus fokus pada penguatan kerja sama dengan pemerintah daerah, perusahaan, dan organisasi sosial untuk membentuk sinergi dan bersama-sama

mempromosikan tata kelola kelautan. Sementara itu, perlu menerapkan penggunaan berbayar lingkungan ekologi laut dan menggunakan pendapatan yang dihasilkan untuk tata kelola lingkungan laut, sehingga dapat meningkatkan pengelolaan lingkungan laut sambil mempertahankannya. Kurangnya pemahaman manusia tentang perlindungan lingkungan laut menjadi akar permasalahan pencemaran lingkungan laut. Oleh karena itu, kita harus memulai dengan membangun kesadaran masyarakat tentang pentingnya mencegah pencemaran lingkungan laut melalui berbagai media, seperti televisi, radio, koran, internet, dan lainnya. Dengan cara ini, kita dapat menyebarkan pengetahuan tentang perlindungan lingkungan laut kepada masyarakat dan meningkatkan kesadaran dan kepedulian mereka terhadap perlindungan lingkungan laut. Selain itu, kita juga perlu memperkuat penyebaran informasi dan penegakan hukum dan peraturan. Hal ini dapat dilakukan dengan meningkatkan hukuman atas pelanggaran hukum dan meningkatkan kesadaran masyarakat akan hukuman atas pelanggaran, sehingga mencapai tujuan untuk mencegah dan mengurangi pelanggaran (Pan, 2023).

Untuk mengatasi tumpahan minyak mentah di laut, ada beberapa metode yang dapat digunakan (**Gambar 11.2**):

1. Salah satu metode untuk mengatasi tumpahan minyak mentah di laut adalah menggunakan *oil dispersant*, yaitu senyawa kimia pengurai molekul-molekul tumpahan minyak menjadi partikel yang lebih kecil, dengan konsentrasi kurang dari 15 ppm. Terdapat tiga jenis dispersant: generasi pertama yang berbasis karbon hidrogen berbau, generasi kedua berbasis parafin, dan generasi ketiga berupa dispersant padat yang bekerja secara otomatis.
2. Metode lain untuk mengatasi tumpahan minyak mentah di laut adalah menggunakan *absorbent*, yang bertujuan untuk mengubah minyak menjadi bentuk yang lebih padat agar mudah menempel pada materi absorbent. Terdapat tiga jenis absorbent: (a) sintesis, yang terbuat dari serat nilon dan busa; (b) anorganik, yang terbuat dari pasir dan tanah liat; (c) organik, yang terbuat dari jerami, kapas, dan serbuk gergaji.

3. Metode lainnya adalah menggunakan *oil boom*, yang berfungsi untuk memisahkan atau mengisolasi minyak yang tumpah sebelum dipindahkan ke tempat pengumpulan.
4. Metode lainnya adalah *in situ burning*, di mana minyak yang tumpah dibakar di tengah laut, namun hanya dapat dilakukan di perairan yang jauh dari pantai. Proses ini harus dilakukan dengan hati-hati karena dapat menimbulkan risiko bahaya bagi kapal-kapal dan benda lain yang berada di sekitarnya (Widodo & Wahyuni, 2020).



Gambar 11.2 Beberapa Metode Penanggulangan Pencemaran Laut oleh Tumpahan Minyak
(Sumber: Widodo & Wahyuni, 2020)

Menurut Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2014 Tentang Kelautan, penanggulangan pencemaran laut dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu: (a) melakukan bioremediasi dengan melepaskan serangga untuk menetralsir tumpahan minyak dari ledakan ladang minyak; (b) melakukan fitoremediasi dengan menggunakan tumbuhan

seperti pohon api-api (*Avicennia marina*) yang mampu menyerap logam berat; (c) melakukan pembersihan laut secara berkala dengan melibatkan partisipasi masyarakat. Lebih lanjut regulasi yang mengatur tentang Perlindungan lingkungan laut khususnya terkait dengan Pencemaran Laut dapat ditelaah dan dipelajari pada undang-undang Nomor 32 Tahun 2014 tentang Kelautan Pasal 52-57 (Lambonan, 2020).

11.3 Penutup

Dalam upaya mencegah dan menangani masalah pencemaran laut oleh tumpahan minyak, berbagai instansi pemerintah seperti Kementerian Lingkungan Hidup, Kementerian Pariwisata, Kemendikbud, Kemenperindag, KKP, TNI AL, Kepolisian, Kemenhub, PT. Pertamina (Persero), dan Pemda memegang peran penting. Melalui kerjasama antar instansi ini, diharapkan penanganan masalah tumpahan minyak di laut dapat dilakukan secara lebih efektif, terintegrasi, dan menyeluruh. Kita semua harus memahami dan menerima bahwa planet ini bukanlah warisan dari leluhur kita, melainkan pinjaman dari generasi yang akan datang.

Bab 12

KONSERVASI DAN PELESTARIAN LINGKUNGAN RUANG LAUT

12.1 Mengapa Konservasi Sumber Daya dan Ruang Laut Diperlukan?

12.1.1 Permasalahan Pemanfaatan Sumber Daya Alam

Saat ini, banyak orang yang berbicara tentang perlindungan sumber daya alam dan lingkungan. Namun mungkin baru kali ini seluruh masyarakat, mulai dari pejabat pemerintah hingga kalangan terbawah, berbincang dengan lantang tentang tragedi yang mereka alami di negeri ini, khususnya di wilayahnya. Hal ini terjadi karena banyaknya bencana atau musibah yang dialami Indonesia, seperti banjir, tanah longsor, dan rusaknya sumber daya alam di wilayah pesisir oleh manusia lainnya.

Meski banyak terjadi bencana alam, baik berupa tanah longsor maupun banjir, namun yang menjadi pertanyaan sekarang adalah apakah pemerintah “tidak berpikir” atau mengharapkan kejadian seperti di atas? Jawabannya iya. Pemerintah mengeluarkan undang-undang yang mewajibkan setiap program pembangunan mencantumkan AMDAL (*Analisis Mengenai Dampak Lingkungan*), melalui Undang-Undang Pemerintah Nomor 27 Tahun 1999. Sebenarnya kajian AMDAL ini sudah berjalan di Indonesia sejak tahun 1986 melalui penerbitan Keputusan Pemerintah Nomor 29 Tahun 1986, Tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan. Misi AMDAL adalah memastikan bahwa pengembangan rencana usaha dan/atau kegiatan yang akan dilaksanakan bermanfaat dan tidak merugikan lingkungan hidup. Pemanfaatan sumber daya alam yang tidak bertanggung jawab oleh perusahaan tidak hanya terjadi di daratan, namun juga di perairan. Aktivitas manusia yang berupaya memanfaatkan kekuatan sumber daya alam yang ada di DAS dan DAS tidak memperhatikan konsep perlindungan alam, sehingga kapasitas

tersebut terus menurun. Sumber daya alam dan kontakannya tidak dilindungi, sehingga (sumber daya hayati) juga ikut musnah.

Ekosistem laut seperti mangrove, padang lamun, dan terumbu karang yang dulunya sangat melimpah baik luas, individu maupun jumlah jenisnya kini semakin bertambah. Pada tahun 1980, Indonesia mempunyai jumlah hutan bakau terbesar di dunia, namun saat ini, luas hutan bakau yang tersisa hanya tinggal sekitar 40%, atau 1,7 juta hektar (Giesen, 1993). Hilangnya hutan bakau dan/atau sistem lainnya akan menyebabkan berkurangnya produktivitas ekosistem pesisir. Padahal subsistem ekosistem di wilayah pesisir mempunyai potensi sumber daya alam baik hayati maupun non hayati yang sangat tinggi. Misalnya, sistem ini berkontribusi terhadap produksi ikan laut di Indonesia sekitar 6,0 hingga 6,7 juta ton ikan/tahun (tangkapan lestari). Meski hanya sekitar 65-75% dari uang tersebut yang dapat dimanfaatkan (dimiliki), sehingga menghasilkan nilai ekspor sekitar US\$ 5,6 miliar. Dengan peningkatan penangkapan ikan, diharapkan produksi ikan tersebut dapat tercapai dan nilai ekspor ikan dapat mencapai sekitar US\$ 10 miliar pada tahun 2028.

Ini adalah strategi yang baik, yang dapat dicapai jika kondisi lingkungan subsistem tetap terjaga, namun jika kondisinya memburuk, bahkan 75% tidak dapat melanjutkan aktivitas monyet. Belum termasuk teknologi penangkapan ikan yang digunakan, karena masih banyak praktik penangkapan ikan yang menggunakan alat penangkapan ikan yang tidak baik bagi lingkungan seperti yang diteliti. Praktik penangkapan ikan yang ada saat ini kurang memperhatikan potensi reproduksi ikan, baik yang masih “muda” (masih bisa mendapatkan pekerjaan) maupun sudah saatnya ditangkap.

12.1.2 Perlunya Kawasan Konservasi dan Ruang Laut

Aktivitas manusia yang tidak terkendali telah menyebabkan rusaknya sumber daya alam. Perusakan ini tidak hanya terjadi di daratan (hutan), namun juga merusak sumber daya alam laut. Oleh karena itu, jika kegiatan tersebut tidak ditata dengan baik, dikhawatirkan akan hilang kekuatan sumber daya alam, termasuk “tumbuhan” baik yang ada di darat (hutan) maupun di laut. Perlu diketahui, Indonesia sudah lama dikenal seperti ini. “megacenter” keanekaragaman hayati global. Hal ini disebabkan oleh luasnya habitat alami, kekayaan flora dan fauna, serta

banyaknya pulau-pulau yang kaya. Terdapat tujuh wilayah di Indonesia yang diketahui menjadi sumber utama bahan baku, yaitu:

1. Sumatera dan pulau-pulau di lepas pantai;
2. Jawa dan Bali;
3. Kalimantan, termasuk Pulau Natuna dan Pulau Anambas;
4. Sulawesi dan pulau-pulau di lepas pantai, termasuk Pulau Sula;
5. Nusa Tenggara;
6. Maluku; dan
7. Papua Barat, termasuk Pulau Kai dan Pulau Aru

Indonesia memiliki setidaknya 47 lingkungan yang unik. Diantaranya adalah hamparan pinus dan es (salju permanen di Gunung Jaya Wijaya) di Papua Barat, serta beragam hutan di Kalimantan dan Sumatra. Ada juga ekosistem danau datar dan rawa dangkal. dan ekosistem terumbu karang, padang lamun, dan hutan bakau yang spektakuler. Indonesia dikenal memiliki jumlah spesies dan genera terbanyak di dunia.

Berdasarkan perkiraan terkini, Indonesia memiliki 542 jenis burung yang tersebar di 24 kawasan burung. Kedua angka tersebut lebih tinggi dibandingkan negara lain. Hal ini mungkin terjadi karena banyak pulau yang sudah lama terisolasi sehingga memungkinkan munculnya spesies lokal. dikenal sebagai spesies "endemik". Jumlah spesies endemik tertinggi terdapat di Sulawesi, Papua Barat dan Kepulauan Mentawai di pesisir barat Sumatera. Meskipun secara keseluruhan spesies endemik di Sumatera tergolong rendah, Kepulauan Mentawai (khususnya Pulau Siberut) memiliki kepadatan spesies endemik per wilayah yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lain di Indonesia. Spesies endemik pulau-pulau di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 12.1 (MacKinnon, 1986).

Tabel 12.1 Spesies endemik pulau-pulau di Indonesia

Kelompok Pulau	Prosentase Spesies Endemis			
	Burung	Mamalia	Reptil	Tumbuhan
Sumatera	2	10	11	11
Jawa	7	12	8	5
Kalimantan	6	48	26	33
Sulawesi	32	60	22	7

Kelompok Pulau	Prosentase Spesies Endemis			
	Burung	Mamalia	Reptil	Tumbuhan
Nusa Tenggara	30	12	18	3
Maluku	33	17	35	6
Papua	52	58		55

(Sumber: MacKinnon, 1986)

Indonesia memiliki banyak hutan hujan dan lautan, dan memiliki banyak hal yang berbeda. Namun hal ini mungkin menghadapi ancaman kehancuran yang mengkhawatirkan di masa depan kehidupan manusia. Untuk mengatasi masalah ini, pemerintah telah menetapkan hutan dan lahan basah sebagai kawasan konservasi (**Gambar 12.1** dan Tabel 12.2), dengan harapan dapat mencegah rusaknya keanekaragaman hayati. Kawasan lindung ini mencakup kurang lebih 564 kawasan lindung seluas 26,9 juta hektar dan 79 kawasan lindung seluas 19 juta hektar, peran keamananlah yang berubah.



Gambar 12.1 Peta Sebaran Kawan Konservasi Indonesia
(Sumber: <https://www.forclime.org/documents/Books/Con%20Area%20Mang%20Indo%201August.pdf>)

Tabel 12.2 Kawasan Konservasi di Indonesia 2023

No	Fungsi	Jumlah
1	Cagar Alam (<i>Nature Reserve</i>)	213
2	Suaka Margasatwa	85
3	Taman Nasional (<i>National Park</i>)	55
4	Taman Hutan Raya	44
5	Taman Wisataa Alam	128
6	Taman Buru	10
	Hutan Lindung	29
Jumlah		564

(Sumber: KSDAE, 2023)

12.2 Ekologi Penting Sumber Daya Laut Pesisir

Indonesia sebagai wilayah tropis mempunyai keanekaragaman hayati yang besar, baik di darat maupun di laut, terutama di sepanjang pesisir pantai. Tingginya tingkat keanekaragaman hayati tidak lepas dari kondisi geofisika dan geologi perairan Indonesia. Seperti yang Anda ketahui, Indonesia merupakan salah satu negara terbesar di dunia, dengan sekitar 17.508 pulau yang membentang sepanjang 5.120 km dari timur ke barat sepanjang garis khatulistiwa dan 1 km dari utara ke selatan.

Luas daratan Indonesia adalah 1,9 juta km² dan luas lautan tercatat sekitar 7,9 juta km² (Boston, 1996). Selain itu, Indonesia mempunyai garis pantai sepanjang kurang lebih 81.791 km sehingga menjadikannya sebagai negara dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia setelah Kanada. Perairan dangkal ini memungkinkan tumbuhnya subur dan beragamnya spesies organisme yang hidup di dalamnya. Ini tersebar di ekosistem laut pesisir, termasuk muara, hutan pantai atau bakau, jembatan, dan terumbu karang, yang diketahui mendukung spesies berbagai jenis organisme.

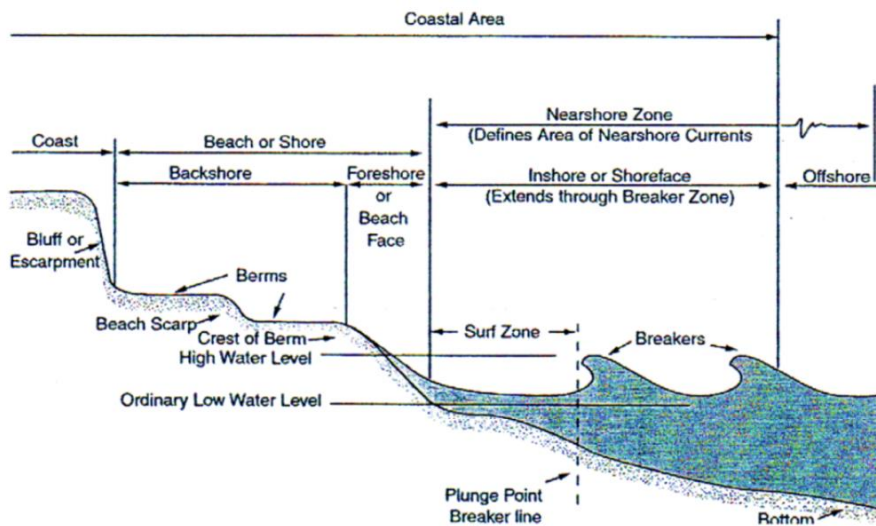
Selain itu, ekosistem ini juga dikenal memiliki potensi besar dalam menunjang produksi ikan. Produktivitas awal di perairan pesisir dapat mencapai lebih dari 10.000 gr C/m²/tahun. Ini merupakan nilai produksi utama yang sangat tinggi atau lebih tinggi dibandingkan dengan produksi semula di perairan dangkal pada umumnya yaitu

sekitar 100 gr C/m²/tahun atau di perairan dalam yang hanya 50 gr C/m²/tahun (Supriharyono, 1982, 2000; Supriharyono *et al.*, 2001, 2003).

Karena tingginya produksi perairan pesisir, perairan tersebut menjadi habitat yang baik bagi ikan dan biota air lainnya, baik itu sebagai tempat berkembang biak, sekolah, atau tempat yang tepat. Agar ekosistem laut perairan pantai mempunyai produksi sekunder atau produksi ikan yang besar. Karena terdapat perbedaan karakteristik geofisika dari masing-masing sistem tersebut, keadaan ini juga akan mencerminkan jenis organisme yang hidup di sana, termasuk potensi ekonomi dari masing-masing sistem tumbuhan.

12.2.1 Batasan Wilayah Pesisir

Wilayah pesisir merupakan tempat bertemunya daratan dan lautan. Wilayah pesisir mencakup wilayah daratan, baik kering maupun terendam, yang dipengaruhi oleh ciri-ciri perairan seperti pasang surut, angin laut, dan air asin. Sedangkan di sepanjang laut, wilayah pesisir meliputi bagian laut yang masih dipengaruhi oleh proses alam yang terjadi di darat, seperti sedimentasi dan arus air, serta perbuatan manusia terhadap dunia, seperti penebangan pohon dan pencemaran. Pembagian wilayah pesisir dapat dilihat pada **Gambar 12.2**.



Gambar 12.2 Pembagian Wilayah Pesisir
(Sumber: Triadmodjo, 1999)

Letak wilayah pesisir erat kaitannya dengan sistem sungai yang mengalir melalui wilayah tersebut. Perubahan yang dapat terjadi pada sifat perairan, baik melalui proses alam maupun melalui aktivitas manusia, baik di permukaan maupun di permukaan tanah, akan berdampak pada wilayah pesisir. Oleh karena itu, wilayah pesisir seringkali menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari sistem perairan.

12.2.2 Ekosistem Mangrove

Istilah mangrove (**Gambar 12.3**) mempunyai dua arti, yang pertama sebagai komunitas atau komunitas pepohonan atau hutan yang tahan terhadap kadar garam/salinitas (air), dan yang kedua sebagai suatu spesies individu (Macnae, 1986). Oleh karena itu, kata "*mangal*" digunakan untuk merujuk pada kawasan hutan dan "*mangrove*" untuk merujuk pada pohon individu. Masyarakat sekitar kita sering menerjemahkan mangrove dengan sebutan hutan mangrove, dimana mangrove merupakan salah satu jenis pohon yang hidup di hutan pasang surut.

Mangrove hidup di daerah dengan curah hujan tertinggi (*high water level*) dan ketinggian dekat atau di atas permukaan laut rata-rata (*mean sea level*). Hutan bakau (pepohonan) hidup di sepanjang garis pantai yang dilindungi di kawasan tropis dan subtropis. Menurut Macnae (1986), hampir 75% mangrove hidup antara 350 LU dan 350 LS dan sebagian besar berada di Asia Tenggara, seperti Malaysia, Sumatera dan banyak wilayah Kalimantan yang mempunyai curah hujan di luar musim. Indonesia mempunyai hutan mangrove seluas 3,75 juta hektar yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Hutan Mangrove hidup di kawasan lindung di kawasan tropis dan subtropis.



Gambar 12.3 Ekosistem Mangrove
(Sumber: Adisty, 2022)

12.2.3 Produksi Hutan Bakau

Sebagai ekosistem muara, hutan mangrove juga merupakan ekosistem pesisir yang sangat produktif. Menurut Fujiwara dan Komai (2009), produksi maksimum hutan mangrove dapat mencapai 5.000 gr C/m²/tahun, sedangkan produksi hutan perawan mencapai sekitar 2.700 gr C/m²/tahun (Tabel 12.3). Namun produksi ini sangat bergantung pada kondisi tumbuh dan musim, misalnya produksi pertama di bawah tegakan (bawah tanah) lebih tinggi dibandingkan dengan produksi di atas (di atas tanah) pada waktu musim gugur hingga awal musim dingin, ketika produksi mencapai nilai terendah. Sebaliknya, pada musim semi, populasi di atas permukaan tanah tumbuh dengan cepat dan biomassa di bawah permukaan tanah menurun. Tumbuhan mangrove sendiri merupakan tumbuhan autotrofik lainnya, seperti makroalga, mikroalga benthik, fitoplankton, epifit, dan neuston, yang juga berkontribusi terhadap keseluruhan jaringan produktivitas utama ekosistem mangrove. Menurut banyak ahli (Lugo, 1990; Lugo *et al.*, 1992; Fujiwara & Komai, 2009), kontribusi autotrof ini dapat mewakili lebih dari setengah total produksi bersih ekosistem mangrove. Hutan bakau tertutup dengan baik, hutan bakau memberikan kontribusi yang besar terhadap produksi, sedangkan kontribusi tanaman autotrofik lainnya mungkin lebih sedikit, karena panas yang berlebihan.

Namun tidak benar jika apinya banyak karena tutupan mangrove tidak mencukupi maka produksi autotrof akan semakin buruk. Menurut

Robertson *et al.* (1992), produksi fitoplankton rendah hingga sedang (10-700 mgC/m³/hari) di perairan mangrove, hal ini bergantung pada kondisi geomorfologi, pergerakan air, kekeruhan dan unsur hara. Oleh karena itu, produksi alga atau fitoplankton tidak hanya disebabkan oleh panas. Penurunan produksi fitoplankton juga mungkin disebabkan oleh pengaruh tanin yang dikeluarkan oleh akar tanaman dan hilangnya detritus dari batang dan daun. Produktivitas mangrove dapat dilihat pada **Gambar 12.4**.



Gambar 12.4 Produktivitas Mangrove

(Sumber: <https://national-oceanographic.com/article/potensi-hutan-mangrove-sebagai-penguat-kawasan-ekowisata-1>)

Tabel 12.3 Produktivitas primer mangrove di beberapa wilayah pesisir Pasifik dan Atlantik

Lokasi		PPK (C/m ² /th)	PPB (C/m ² /th)	Tipe Mangrove
Fahkahatchee Bay, Florida		5.073	1.752	Mangrove Merah, Hitam, dan Putih

Lokasi	PPK (C/m ² /th)	PPB (C/m ² /th)	Tipe Mangrove
Lower Fahka Union River Basin, Florida	4.307	2.737	Mangrove Merah, Hitam, dan Putih
Upper Fahka Union River, Basin, Florida	3.759	2.409	Mangrove Merah, Hitam, dan Button wood
Rooke Ba, Florida	3.258	1.022	Hutan Mangrove Hitam
Kay Largo, Florida	3.258	1.022	Hutan Mangrove Hitam
	2.299	1.606	Mangrove Merah
Kay largo, Florida	1.934	0	Mangrove Merah
Hammcock Forest, Dade Co., Florida	693	474	Mangrove Merah
Scrub Forest, Dade Co. Florida	511	0	Mangrove Merah
La Perguera, Puerto Rico	2.993	1.606	Mangrove Merah
	2.993	0	Mangrove Merah
Asia Tenggara	-	950-1.950*	<i>Rhizopor apiculata</i>
Indonesia	-	495-1.495*	Campuran <i>Rhizopora spp</i>
China		1.750*	<i>Bruguiera saxangula</i>
New Guinea		875-1.895*	Campuran <i>Rhizopora spp</i>

(Sumber: Lugo & Snedaker (1974); Alongi 1998 dalam Supriharyono 2006)

PPK = Produktivitas Primer Kotor

PPB = Produktivitas Primer Bersih

* = angka telah dikonversi dari satuan gram berat kering/ m²/th ke karbon, dengan asumsi ratio karbon/berat kering adalah 50%

12.2.4 Keanekaragaman Jenis Mangrove dan Distribusinya

Diperkirakan terdapat sekitar 89 spesies mangrove yang tumbuh di seluruh dunia. Pohon bakau biasanya hidup di hutan pantai Asia Tenggara, berjumlah sekitar 74 spesies, dan hanya sekitar 11 spesies yang hidup di kawasan Karibia. Jumlah ini sekitar 51% atau 38 spesies yang hidup di Indonesia (**Gambar 12.5**). Jumlah tersebut belum termasuk spesies berkerabat yang hidup berdampingan di kawasan mangrove. Jenis tumbuhan pantai ini banyak sekali, sekitar 12 sampai 16 jenis, namun masih ada keraguan apakah tumbuhan tersebut termasuk

tumbuhan bakau atau tidak (Waisel, 1972; Walsh, 1974; Dawes, 1981; dalam Supriharyono 2006). Misalnya, famili Rhizophoraceae mempunyai 17 genera dan sekitar 70 spesies, namun hanya empat genera dan 17 spesies yang dikenal sebagai mangrove. Demikian pula dalam famili Cornbretaceae, hanya tiga genera dan lima spesies yang dikenal sebagai mangrove.



Gambar 12.5 Distribusi Mangrove di Indonesia

(Sumber: <https://jikalahari.or.id/kabar/klipingberita/21-hutan-mangrove-dunia-ada-di-indonesia-ini-3-provinsi-terbesar/>)

12.2.5 Ekosistem Padang Lamun

Lamun (**Gambar 12.6**) juga merupakan tanaman asli perairan pesisir atau perairan dangkal. Komunitas lamun yang hidup di sini merupakan komunitas tumbuhan monokotil (monokotil) dari kelas Angiospermae. Yang membedakan tanaman ini dengan tanaman air lainnya adalah adanya sistem perakaran dan rimpang yang besar. Karena jenis perakarannya, daun rumput laut menjadi besar sehingga

mempunyai manfaat yang besar dalam menunjang produksi rumput hijau.

Beberapa rumput laut seperti *Thalassia testudinum*, *Cymodocea manatrum*, *Diplanthera wrightii* dan *Ruppia maritima* juga diketahui mempunyai tumbuhan epifit (biru kehijauan) yang menunjukkan aktivitas pengikatan nitrogen (Stewart, 1969 dan Supriharyono 2006). Fiksasi nitrogen lamun berkisar antara 2,4-16,5 mg N/mg N tanaman/jam dengan cahaya. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi nitrogen berperan penting dalam reproduksi komunitas di laut sehingga menyebabkan tingginya wilayah tersebut.



Gambar 12.6 Ekosistem Padang Lamun

(Sumber: <https://www.goodnewsfromindonesia.id/2022/01/19/pentingnya-peran-padang-lamun-sebagai-penunjang-kehidupan-biota-laut>)

12.2.5.1 Produktivitas Padang Lamun

Banyak peneliti yang menyebutkan bahwa produktivitas primer kota lamun mencapai lebih dari 1 kg C/m²/tahun. Bahkan menurut Mc Roy dan MC Millan (1977) dalam Supriharyono (2006), produksi utama beberapa spesies dan kawasan yang sangat subur dapat mencapai 6.825 g C/m²/tahun. Produksi ini biasanya berasal dari bawah ke atas. Produksi primer dari bagian pangkal yaitu akar dan rimpang memberikan kontribusi yang cukup besar, sekitar 2 sampai 36% dari total produksi

tanaman atau sekitar 10 sampai 40% di dasar laut. Demikian pula untuk total biomassa, unsur utama dapat menyumbang sekitar 30-75%, bahkan beberapa spesies, seperti *Cymodocea serrulata*, *Syringodium isoetifoli*, dapat menyumbang lebih banyak. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi komponen utama lamun berpengaruh signifikan terhadap pemanfaatan organisme laut. Namun, karena biomassa bersifat sementara, potensinya bergantung pada apakah hewan menggunakannya atau tidak. Produktivitas padang lamun dapat dilihat pada **Gambar 12.7**.

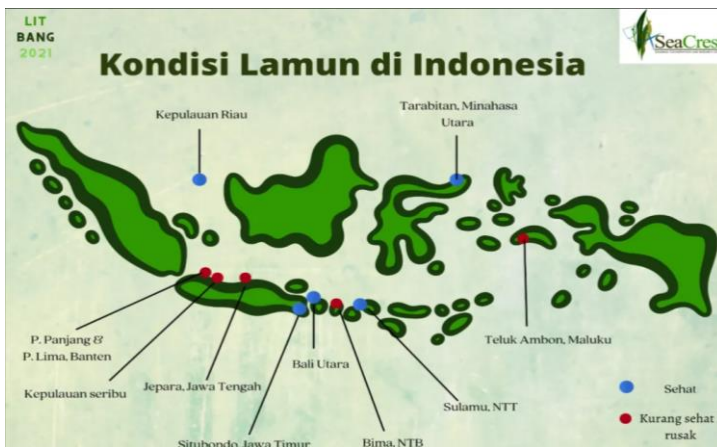


Gambar 12.7 Produktivitas Padang Lamun
(Sumber: Fortes, 1990)

Karena tidak semua organisme perairan memanfaatkannya, hanya sejumlah kecil herbivora yang mengkonsumsinya (Kirkman & Reid, 1979 dalam Supriharyono, 2006). Selain itu, menurut mereka, dari produksi tahunan tanaman lamun yang diteliti yaitu *Posidonia australis*, di perairan muara dekat Sydney, Australia, ditemukan 37%-nya jatuh ke air tanah dan dimanfaatkan oleh hewan benthik (detrivorus) berupa detritus, 12%. Merupakan daun yang mengapung ke permukaan dan hilang di luar lingkungan, hanya 3% produksinya yang dimanfaatkan langsung oleh herbivora. Sisanya atau 48% merupakan bagian vegetasi yang masih hidup atau belum dimanfaatkan.

12.2.5.2 Keanekaragaman Lamun dan Distribusinya

Rumput laut tumbuh di perairan dangkal dan tersebar luas dari Arktik bagian utara hingga Afrika bagian selatan dan Selandia Baru. Fokusnya ada pada dua kawasan utama, yaitu Indo-Pasifik dan pesisir Amerika Tengah, serta kawasan Karibia-Pasifik. Menurut Den Hartog (1970) dan Supriharyono 2006, bulu babi di seluruh dunia mempunyai dua famili, 12 genera dan 49 spesies. Dari dua belas genera, tujuh hidup di perairan tropis, yaitu *Enhalus*, *Thalassia*, *Halophila*, *Halodule*, *Cymonodocea*, *Syringodium* dan *Thalassidondron*. Berbagai macam lamun terdapat di kawasan Indo-Pasifik, yang memiliki tujuh marga subtropis dan 25 spesies laut subtropis, 12 diantaranya terdapat di Indonesia. Distribusi padang lamun di Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 12.8**.



Gambar 12.8 Distribusi Padang Lamun di Indonesia

(Sumber: <https://seacrest.or.id/kondisi-padang-lamun-yang-ada-di-beberapa-wilayah-perairan-di-indonesia/>)

12.2.6 Ekosistem Terumbu Karang

Terumbu karang merupakan suatu komunitas karang (hewan) yang hidup di laut, berupa batu gamping (CaCO_3), dan mempunyai daya tahan yang cukup dalam menahan kekuatan gelombang. Hewan karang ini biasanya memiliki tulang berkapur, seperti alga yang berasosiasi dengan lingkungan ini, dan banyak di antaranya mengandung batu kapur. Selain biota tersebut, banyak organisme lain seperti ikan,

krustasea, dan lobster juga hidup dalam konteks ekosistem terumbu karang (Dawes, 1981 dalam Supriharyono, 2006).

Mengenai terumbu karang, dibedakan antara karang sebagai organisme individu atau bagian dari komunitas, dan terumbu karang sebagai organisme, termasuk hewan karang. Karang ada dua jenis, yaitu karang yang membentuk struktur berkapur (karang hermatipik) dan karang yang tidak membentuk karang (karang ahermatipik). Karang hermatipik merupakan koloni karang yang dapat menghasilkan air dari kalsium karbonat (CaCO_3), oleh karena itu sering disebut karang pembangun. Karang ahermatipik merupakan koloni karang yang tidak mampu menghasilkan air dalam jumlah besar. Karang hermatipik adalah hewan yang selama hidupnya melakukan bioseminasi dengan sejenis alga (*zoorgufhellne*), yang hidup di jaringan polip karang yang melakukan fotosintesis (Lasser, 2004). Distribusi terumbu karang di Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 12.9**.

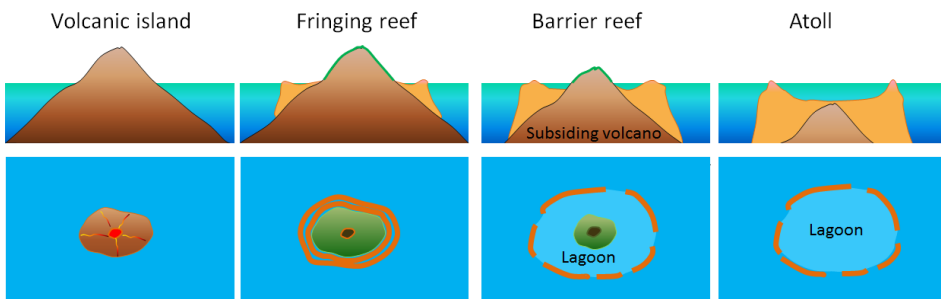


Gambar 12.9 Distribusi Terumbu Karang di Indonesia

(Sumber: <https://www.manajemensekolah.web.id/2020/05/lembar-kerja-peserta-didik-persebarang.html>)

Hasil aktivitas fotosintesis adalah endapan kalsium karbonat yang mempunyai struktur dan bentuk yang unik. Fitur inilah yang nantinya digunakan untuk mengidentifikasi karang. Karena adanya fotosintesis tersebut maka peran sinar matahari menjadi sangat penting pada karang hermatipik. Oleh karena itu, terumbu karang jenis ini biasanya hidup di pesisir/perairan dangkal yang sinar matahari masih menembus dasar

laut. Selain itu, karang membutuhkan air hangat dengan suhu antara 25 dan 32 °C untuk bertahan hidup. Karena gaya hidup tersebut, terlihat jelas bahwa terumbu karang banyak terdapat di Indonesia. Diperkirakan Laut Koral di Indonesia akan menempati 7.500 km² perairan Indonesia. Berdasarkan geomorfologi, ekosistem terumbu karang dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu ekosistem perairan tawar, terumbu penghalang, dan terumbu karang (atoll) (**Gambar 12.10**). Sesuai dengan namanya, terumbu karang tumbuh di pesisir pantai. Berbeda dengan terumbu karang, terumbu karang ini dipisahkan dari daratannya oleh sebuah laguna (laggon). Sedangkan terumbu karang cincin merupakan terumbu karang berbentuk lingkaran atau lonjong yang mengelilingi goha.



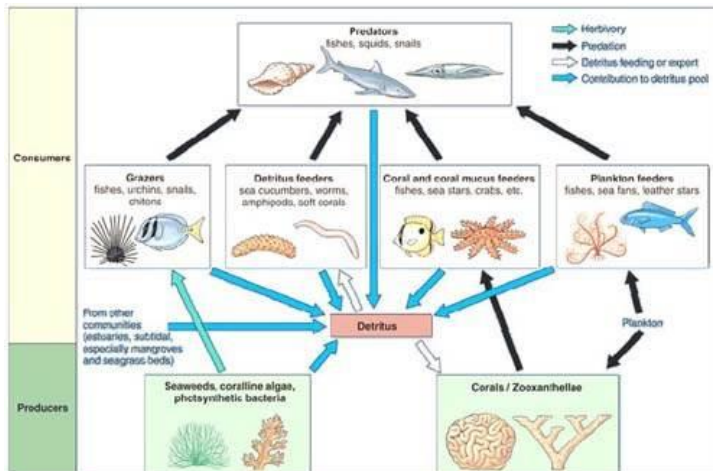
Gambar 12.10 Tipe Terumbu Karang

(Sumber: <https://www.dictio.id/t/apa-saja-tipe-tipe-atau-macam-macam-terumbu-karang/83787>)

12.2.6.1 Produktivitas

Kehadiran *zooxanthellae* di polip karang membantu hewan karang memproduksi atau memperbaiki karbon. Semakin banyak *zooxanthellae* yang dimiliki polip karang, semakin banyak karbon yang difiksasi atau dengan kata lain semakin besar produktivitas primernya. Diperkirakan kandungan zooxanthelles sekitar 1,0 hingga 5,0 × 10⁶ sel/cm² permukaan karang, sehingga kandungan zooxanthelles sekitar 1,0 hingga 5,0 × 10⁶ sel/cm² permukaan karang. semakin tinggi luas permukaan karang yang menghasilkan karbon. Kandungan ini berbeda-beda tergantung jenis karangnya, sehingga produksinya pun berbeda-beda tergantung jenisnya. Goreau (1961), Stoddart (1969), dan Odum (1971) dalam

Suharsono (1999) mengatakan bahwa terumbu karang merupakan ekosistem laut paling dangkal di planet ini dan paling produktif di perairan tropis, mungkin di antara organisme laut dan darat. Produktivitas terumbu karang dapat dilihat pada **Gambar 12.11**.



Gambar 12.11 Produktivitas Terumbu Karang

(Sumber: <https://rezamuhammadazhar.wordpress.com/2010/04/15/resume-ekologi-laut-tropis/>)

Terumbu karang terdapat pada lingkungan laut dangkal dan mempunyai produktivitas yang rendah, namun produktivitas pada terumbu karang itu sendiri sangat tinggi. Misalnya saja perairan Atol Rongelap di Kepulauan Marshall yang memiliki produktivitas maksimum sekitar 100 kg. 1800g C/m²/tahun. Pada saat yang sama, produktivitas air di sekitarnya tercatat sekitar 28 g C/m²/tahun. Selain itu, produksi utama di sebagian besar terumbu karang adalah antara 1500 dan 3500 gC/m²/tahun dan produksi ini sekitar 100 kali lebih banyak dibandingkan dengan terumbu karang di sekitarnya (Sargen & AVÉtin, 1954; Steemann-Nielsen, 1954; Yonge, 1963; Stoddart, 1969 dalam Suharsono, 1999). Gordon dan Kelly (1962) dalam Suharsono (1999) bahkan memperoleh nilai produktivitas pertama yang tinggi, sekitar 11-680 g C/m²/tahun, untuk perairan cekungan Hawaii. Namun sebaliknya, fitoplankton banyak ditemukan di perairan sekitar karang, dan tingkat produktivitasnya hanya tercatat sekitar 21-37 gC/m²/tahun (Doty & Oguri, 1956 dalam Suharsono, 1999). Hal ini menunjukkan bahwa

ekosistem terumbu karang dapat menciptakan produksinya sendiri, tidak bergantung pada lingkungan di sekitarnya. Inilah sebabnya mengapa terumbu karang sering disamakan dengan “oasis” di perairan dangkal (Salm, 1984 *dalam* Suharsono, 1999). Kualitas air terumbu karang yang tinggi jika dibandingkan dengan air (di tepi pantai) yang mendukung produksi sumber lain seperti fitoplankton, padang lamun, mikro dan makroalga. perbandingan produktivitas kotor (PPK) terhadap produktivitas primer bersih (PPB) pada air laut, terumbu karang, dan sumber yang dihasilkannya.

12.2.6.2 Keanekaragaman dan Sebaran Karang

Karang tumbuh di perairan tropis, meski hanya sedikit yang mampu bertahan dalam kondisi basah. Menurut Rosen, keanekaragaman karang menurun seiring bertambahnya garis lintang. Terdapat dua kawasan gugusan terumbu karang, yaitu kawasan Indo-Pasifik dan kawasan Atlantik (Karibia). Jumlah spesies karang (*coral building*) yang tumbuh di Indo-Pasifik cenderung lebih tinggi dibandingkan di Atlantik.

Menurut Wells (1950) dan Rosen (1971) *dalam* Suharsono (1999), terdapat 83 genera karang (*hermatypic scleractini corals*) yang hidup di Indo-Pasifik, sedangkan di Atlantik, hanya tercatat 26 genera (Stoddart, 1964 *dalam* Suharsono, 1999). Genera umum ditemukan di Indo-Pasifik seperti *Styloporin*, *Pocilloporin*, *Hydnaphora*, *Leptoria*, *Pavona*, *Seriatopora* dan *Goniopora* tidak ditemukan di kawasan Atlantik (Stoddart, 1969; Milliran, 1973 *dalam* Suharsono, 1999), sedangkan banyak genera yang ditemukan di kawasan Atlantik tidak ditemukan di kawasan Atlantik. Indo-Pasifik. Selain itu, tidak hanya jumlah genera yang lebih tinggi di kawasan Indo-Pasifik, namun jumlah spesies di setiap kategori juga lebih tinggi dibandingkan di kawasan Atlantik. Misalnya pada genus *Acropora* tercatat lebih dari 150 spesies di Indo-Rasifikt, sedangkan di Atlantik tercatat tiga spesies. Begitu pula dengan jumlah spesies pada genus *Porites*, di Indo-Pasifik terdapat 8 spesies yang tercatat di Atlantik hanya 4 spesies. Sebaran/luasan terumbu karang di Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 12.12**.



Gambar 12.12 Sebaran/Luasan Terumbu Karang di Indonesia
(Sumber: <https://validnews.id/nasional/Memagari-Terumbu-Karang-Dari-Keserakahan-Manusia-yri>)

Keanekaragaman karang terbesar tercatat di kawasan Indo-Pasifik di Melanesia, Asia Tenggara, dengan lebih dari 50 genera dan 700 spesies, dimana sebagian besar terumbu karang di kawasan ini memiliki 20 hingga 40 genera (Stoddart, 1969 *dalam* Suharsono, 1999). Sedangkan menurut Rosen (1971) *dalam* Suharsono (1999), dari kawasan Melanesia bagian atas, jenis karang yang ada di Indonesia berbeda. Selain itu, dari hasil ekspedisi Snellius II tahun 1984 di perairan Indonesia bagian timur, ditemukan jumlah karang hermatipik di perairan tersebut sebanyak 76 genera dan 362 spesies (Borel-Best *et al.*, 1989 *dalam* Suharsono, 1999). Terumbu karang yang hidup di daerah tropis seringkali mempunyai banyak spesies yang berbeda-beda. Namun menurut Connell (1978) *dalam* Suharsono (1999), keanekaragaman karang di daerah tropis seringkali sangat buruk dan jika tidak ada gangguan maka keanekaragamannya akan menurun. Perbedaan tertinggi terjadi ketika terjadi “gangguan”, pada tingkat sedang baik frekuensi maupun intensitasnya.

Sebaliknya, keanekaragaman yang rendah terjadi pada kondisi ekstrim, yaitu tidak ada gangguan atau permasalahan yang serius. Saat ini, aktivitas alam yang mendukung kegiatan pembangunan di wilayah pesisir, seperti pertanian, industri, pelayaran, perikanan, dan

pertambangan (KCN) serta bahan peledak antara lain, dan mendukung kejadian alam seperti angin topan, gempa bumi, panas ekstrem (El Nino). dan mengganggu ekosistem terumbu karang di Indonesia. Banyak ekosistem terumbu karang yang rusak. Misalnya, aktivitas manusia seperti penangkapan ikan dan bahan peledak dan/atau penggalian pasir dan karang, baik untuk keperluan konstruksi maupun akuarium, di Kepulauan Seribu diketahui berdampak pada kehidupan karang di kawasan tersebut.

12.2.7 Kegiatan yang Merusak Sumber Daya Pesisir dan Laut

Pemanfaatan sumber daya alam yang tidak terkendali di wilayah pesisir dapat merusak sumber daya alam itu sendiri. Kita tahu bahwa banyak aktivitas manusia yang dapat menyebabkan kerusakan lingkungan pesisir dan laut (**Gambar 12.13**). Aktivitas manusia tersebut dapat dikelompokkan ke dalam berbagai kategori, yaitu pemukiman, pertanian, perikanan, industri, pariwisata (air), pelayaran (termasuk pelabuhan), pertambangan dan energi. Beberapa kegiatan tersebut bersifat spesifik, yaitu merusak sumber daya alam di wilayah pesisir, misalnya penangkapan ikan dan bahan peledak, penenggelaman kapal, pembukaan pelabuhan dengan perahu di kawasan karang, pemulihan struktur karang dan/atau dekorasi akuarium (perdagangan akuarium), dan secara tidak langsung terutama melalui produksi limbah yang dibuang ke perairan. Limbah ini dapat mencemari lingkungan dan sumber daya alam, termasuk keanekaragaman hayati di lingkungan laut. Permasalahan pencemaran laut dan lingkungan perairan telah muncul dimana-mana, terutama di negara-negara berkembang. Pencemaran ini disebabkan oleh masuknya zat asing ke dalam lingkungan akibat aktivitas manusia yang mengubah sifat kimia dan biologi lingkungan (Ketchum, 1967 dan Warren, 1971 *dalam* Suharsono, 1999).

Diketahui bahwa sumber daya alam juga dapat melakukan perubahan lingkungan hidup sebagai bagian dari upaya pengelolaan lingkungan hidup. Pencemaran air seringkali disebabkan oleh pemukiman manusia, pariwisata dan industrialisasi di sepanjang sungai. Kegiatan tersebut baik secara langsung maupun tidak langsung (melalui sampah) mengganggu kehidupan di perairan pesisir. Lautan yang luas dipercaya dapat menghancurkan atau melarutkan apapun yang dibuang

ke dalam air laut. Polutan-polutan ini dapat mempengaruhi kehidupan akuatik dan siapa saja yang memanfaatkannya, termasuk manusia.



Gambar 12.13 Dampak Aktivitas Manusia

(Sumber: <https://lautsehat.id/flora-fauna/mala/mikroplastik-di-ekosistem-lamun/>)

Polutan juga diketahui mempengaruhi populasi ikan. Menurut Ketchum (1971) dalam Suharsono (1999), dampak pencemaran terhadap ikan dapat bersifat langsung dan tidak langsung. Dampak langsung berarti berdampak pada pencemaran ikan. Namun akibat tidak langsung merupakan akibat yang tidak langsung berakibat fatal, akibat ini baru muncul setelah beberapa waktu. Dampak tidak langsung bisa lebih berbahaya dibandingkan dampak langsung. Efek tidak langsung bergantung pada variabel individual. Hal ini disebabkan hanya spesies yang tahan terhadap pencemaran saja yang mendominasi di kawasan yang tercemar, sedangkan spesies lain yang tidak tahan terhadap pencemaran akan mati atau meninggalkan kawasan tersebut. Bahan-bahan pencemar di lingkungan laut dapat dilihat pada Tabel 12.4.

Tabel 12.4 Bahan-bahan pencemar di lingkungan laut.

Bahan Pencemar	Sumber-sumber pencemar
Pathogen	Sampah dan limbah manusia (Tinja)
Sedimen	Usaha pertanian
Sampah padat	Sampah domestik olahan dan bahan-bahan sisa industri

Bahan Pencemar	Sumber-sumber pencemar
Panas	Pembangkit Tenaga Listrik
Air Tawar	Sistem drainase (dam) yang kurang baik
Air Asin (Brine)	Limbah Industri desalinisasi
Racun an-organik	industri
Racun Organik	Pestisida, seperti fungisida, herbisida, rodentisida dan juga penambahan bahan-bahan organik termasuk hidrokarbon berhalogen, petroleum dan industri kimia
Petroleum	Kecelakaan laut, seperti kerusakan tanker atau kehilangan selama transfer, kebocoran alam, kehilangan pula produksi lepas pantai. Kehilangan selama proses pemurnian (refining), dari <i>run-off</i> ceceran oli bekas untuk automobile, dan hidrokarbon yang tidak terbakar selama pembakaran dan lepas ke atmosfer melalui saluran pipa pembuangan udara (crpnbustion enhaust)
Unsur hara Unsur	Limbah Domestik pertanian daerah urban
Unsur Radioaktif	Pembangkit Tenaga Nuklir, industri penghasil dan pemrosesan kembali bahan bakar untuk pembangkit tenaga nuklir. seluruh aktivitas yang menggunakan uranium, aktivitas lainnya. seperti pembakaran batu bara, peristiwa alam, uji coba nuklir, drainase dari kecelakaan dan industri terisolasi
BOD	Semua yang memanfaatkan oksigen
Asam dan basa	Industri
Bahan-bahan yang secara estetika tidak atau kurang nyaman	Sampah domestik dan industri

Sumber: Cronin (1975)

Dalam kondisi ekstrim, seperti oksigen yang hampir terlarut (jarang terjadi), populasi yang hidup mungkin hanya berupa bakteri anaerob. Dampak tidak langsung lainnya, polusi dapat berupa perubahan “kesuburan” manusia. Meski proyeksinya bisa hidup tumbuh di kondisi air, mereka sebenarnya bisa berkembang biak. Misalnya, suhu air merupakan faktor yang sangat penting dalam menentukan waktu reproduksi banyak organisme akuatik. Polutan juga dapat mempengaruhi perilaku organisme perairan. Komunikasi antar organisme di dalam air diatur secara kimia (kemotaksis). Ikan anadromous, seperti salmon, bermigrasi ke air tawar atau sungai ketika ingin berkembang biak karena rangsangan kimiawi untuk berpindah ke tempat pemijahan. Pencemaran air dapat menghambat rangsangan ini dan menyebabkan penurunan populasi ikan anadromous. Namun yang jelas pencemaran di kawasan tersebut akan meningkatkan tingkat “kemerahan” ikan-ikan yang menempuh perjalanan berkilo-kilometer dari tengah laut tersebut.

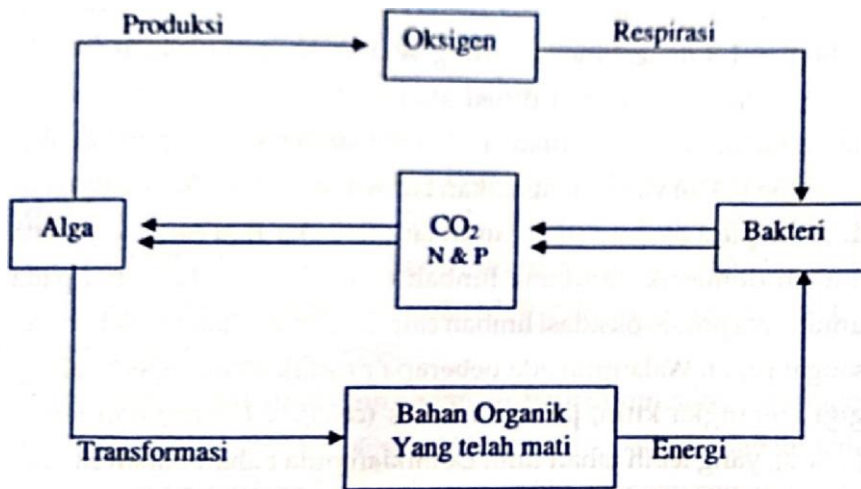
Berdasarkan berapa lama dampak polutan terhadap tubuh diketahui, dampak pencemaran dibedakan menjadi dua jenis, yaitu dampak akut dan kronis. Efek akut terjadi dengan cepat, sedangkan efek kronis umumnya muncul setelah jangka waktu yang lama, seperti pada kasus polusi “karsinogenik”, atau efek diketahui secara tiba-tiba namun efek ini muncul dalam jangka waktu yang lama. Masalah pencemaran air lainnya adalah masalah domestik yang disebabkan oleh eutrofikasi. Padahal mitos tersebut merupakan fenomena alam yang terjadi akibat penuaan danau atau badan air lainnya. Namun hal ini dapat dengan mudah dilakukan dengan memasukkan nutrisi dari limbah rumah tangga ke perairan tersebut.

Meningkatnya kesuburan perairan dan perubahan keseimbangan alam dapat menyebabkan ledakan (penetasan) jenis-jenis fitoplankton, namun mereka berfungsi sebagai makanan bagi hewan-hewan di perairan tersebut. Akibat “ledakan” fitoplankton, air tidak akan memiliki oksigen (terlarut) di malam hari, sehingga berbahaya bagi biota laut. Kegiatan pembangunan di Indonesia saat ini memungkinkan terjadinya pembuangan sampah dalam jumlah besar ke lingkungan perairan, termasuk laut. Limbah-limbah tersebut tidak hanya berasal dari kegiatan industri yang biasa terjadi di pantai saja, namun juga dari kegiatan lain

seperti perumahan, pertanian, pariwisata, pelayaran, pelabuhan, pertambangan dan lain-lain. Berikut ini penjelasan mengenai aktivitas-aktivitas yang mempengaruhi daerah aliran sungai, dan potensi dampaknya terhadap ekosistem laut.

12.2.7.1 Aktivitas Pemukiman

Kegiatan rumah tangga sehari-hari yang berhubungan dengan sampah antara lain mandi, mencuci, memasak, mandi, penyemprotan hama (nyamuk), dan pertanian (penanaman, penyemprotan hama, pemupukan). Sampah hasil kegiatan tersebut sering disebut dengan rumah. Namun definisi sampah domestik yang sering dibicarakan adalah sampah cair dan padat yang berasal dari perkotaan, termasuk sampah kota dan industri. yang masuk ke sistem pembuangan limbah kota. Secara umum sampah domestik terdiri dari sampah padat, berupa sampah, sampah dapur, dan sampah cair dari rumah. Menurut GESAMP (1976), sampah secara umum mempunyai lima ciri, yaitu: 1) Mengandung bakteri, virus dan mungkin virus; 2) Mengandung bahan organik dan bahan tersuspensi sehingga BOD (*Biological Oxygen Demand*); 3) Mengandung padatan (organik dan anorganik) yang larut ke dalam tanah. 4) Mengandung unsur hara terutama komponen fosfor dan nitrogen dan 5) Mengandung bahan terapung dalam bentuk organik dan anorganik. Kondisi ini kerap mengurangi kenyamanan, menghambat laju fotosintesis, dan memengaruhi metabolisme tubuh. Sifat kimiawi pestisida organoklorin merupakan serangga yang sangat berbahaya bagi lingkungan perairan. Bagian ini sulit larut dalam air dan tidak mudah terbakar, sehingga bahan ini banyak terakumulasi di lingkungan perairan dan sangat beracun serta berbahaya bagi kehidupan makhluk hidup di dalam air. Skema sirkulasi oksigen dan unsur hara dapat dilihat pada **Gambar 12.14**.



Gambar 12.14 Skema Sirkulasi Oksigen dan Unsur Hara
(Sumber: Gerlach, 1981)

Berdasarkan ciri-ciri sampah rumah tangga tersebut di atas, maka dapat dikatakan bahwa sampah-sampah tersebut dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat, misalnya akibat pencemaran sampah rumah tangga dan kawasan wisata di pesisir pantai (air laut pantai), penangkapan ikan, mempengaruhi orang lain, acara publik, dan fasilitas (kenyamanan).

12.2.7.2 Aktfitas Pertanian dan Eutrofikasi

Untuk mencapai produktivitas yang tinggi pada pertanian skala besar, perencanaan produksi dilakukan melalui penyiapan tanaman (tanah). Lansekap akan menghasilkan limbah sedimen yang setelah dikeringkan, akan dibuang ke perairan umum. Partikel sedimen yang terangkut juga akan mengandung unsur hara seperti fosfor, nitrogen, kalium, kalsium dan magnesium yang belum terdegradasi atau digunakan oleh praktik pertanian sebelumnya. Meningkatnya penggunaan pupuk anorganik di bidang pertanian akan menyebabkan pencemaran unsur hara pada air dan tanah. Hilangnya unsur hara dan ekosistem akan menimbulkan permasalahan pada perairan umum, seperti sungai, danau, dan perairan pantai. Kandungan unsur hara di pantai atau perairan umum akan menyebabkan ketersediaan unsur hara

berlebihan atau rusaknya organisme perairan. Dampak aktivitas pertanian terhadap lingkungan dapat dilihat pada **Gambar 12.15**.



Gambar 12.15 Dampak Aktivitas Pertanian Terhadap Lingkungan
(Sumber: <https://www.idntimes.com/science/experiment/ina-suraga/mengenal-eutrofikasi-c1c2>)

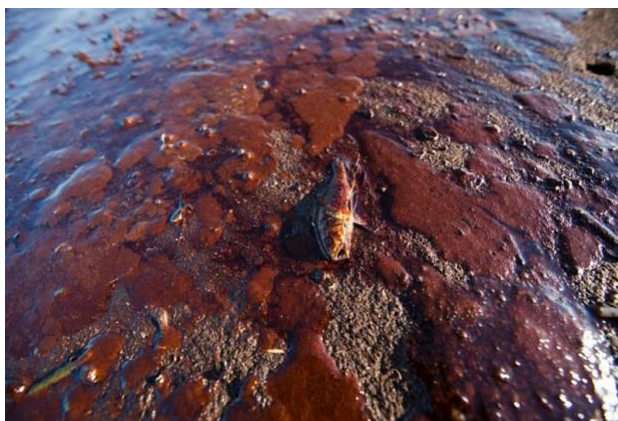
Daur ulang sampah rumah tangga (organik) tidak hanya menghasilkan karbon dioksida dan air, tetapi juga unsur anorganik, seperti nitrogen dan fosfor, dari protein dan tumbuhan. Nitrat, fosfat dan garam lainnya merupakan nutrisi untuk pertumbuhan tanaman. Banyak tanaman kaya akan nutrisi yang bermanfaat bagi satwa liar dan hewan lain dalam rantai makanan dan ekosistem. Pada siang hari, produksi oksigen terlarut sangat tinggi bahkan bisa terjadi kondisi jenuh. Sebaliknya pada malam hari biasanya terjadi kondisi “anoxic” akibat penggunaan oksigen terlarut untuk respirasi dan tersingkirnya makhluk hidup dari benda mati. Keadaan seperti ini disebabkan oleh ledakan (*bloom*) jumlah fitoplankton akibat banyaknya unsur hara, baik yang berasal dari kotoran manusia maupun limbah pertanian.

12.2.7.3 Aktivitas Industri

Minyak bumi (petroleum) merupakan campuran kompleks bagian-bagian sumber daya alam yang dihasilkan dari proses penguraian tumbuhan dan hewan yang telah terjadi sejak lama secara geologis. Minyak tersedia dalam berbagai bentuk, seperti gas (gas alam), cair (minyak mentah), padat (aspal, tar, dan bitumen) atau kombinasi dari

berbagai bentuk tersebut. Minyak memiliki komposisi kimia yang beragam dan lebih dari setengahnya (50-98%) adalah hidrokarbon. Minyak bumi terdiri dari tiga komponen utama antara lain hidrokarbon parafin, hidrokarbon neptenik, dan aromatik. Di antara bahan kimia dalam minyak bumi yang sebagian besar organisme tidak dapat terurai adalah alkana, naftena, siklopentena, dan sikloheksana. Jika hal-hal tersebut mencemari lingkungan maka akan memakan waktu yang lama dan hewan-hewan yang membusuk di perairan tersebut tidak akan musnah. Dengan tidak terurainya komposisi kimia minyak maka akan mengganggu sistem pangan masing-masing ekosistem. Rusaknya rantai makanan merupakan bencana besar bagi seluruh makhluk hidup yang bergantung pada keberadaan lingkungan pada setiap sumber dayanya.

Limbah industri merupakan sumber utama pencemaran perairan, baik pesisir maupun laut. Penggunaan IPAL (Instalasi Pengolahan Air Limbah) tidak memenuhi standar yang ditetapkan untuk limbah cair, dan limbah industri tidak larut atau sulit larut dalam air. Penggunaan bahan kimia seperti sianida, fenol dan natrium pentaklorofenat akan mengubah kualitas air baik secara langsung maupun tidak langsung, misalnya dengan menurunkan kadar oksigen terlarut untuk penguraian bahan organik. Beberapa bahan kimia ini juga menyebabkan bioakumulasi sehingga menyebabkan masalah lingkungan jangka panjang (**Gambar 12.16**).



Gambar 12.16 Dampak Aktivitas Industri

(Sumber: <https://bonaventura21.wordpress.com/2014/01/25/pencemaran-laut-akibat-tumpahan-minyak/>)

Bab 13

PERAN KOMUNITAS LOKAL DALAM PENGELOLAAN LINGKUNGAN RUANG LAUT

13.1 Peran Komunitas Lokal

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), **komunitas** diartikan sebagai kelompok organisme yang hidup dan saling memiliki ikatan interaksi di dalam wilayah tertentu, masyarakat, paguyuban. Contoh : komunitas desa merupakan komunitas yang hidup di desa serta memiliki ciri khas desa, komunitas hutan bakau yakni komunitas yang hidup di hutan bakau di daerah Pantai, komunitas sastra adalah kelompok atau kumpulan orang-orang yang punya kesukaan, minat dan berkecimpung dalam bidang sastra, atau dikenal dengan masyarakat sastra. Sedangkan **Lokal** menurut KBBI, yaitu ruang yang luas, terjadi disuatu tempat, semisal tempat (pembuatan, produksi, tumbuh, hidup dan sebagainya).

Suerjono Soekanto, seorang sosiolog asal Indonesia berpendapat bahwa komunitas adalah rakyat berdiam diri atau bertempat tinggal merujuk pada warga desa, kota, suku, atau bangsa, yang hidup sedemikian rupa, sehingga merasakah bahwa kelompok tersebut dapat memenuhi kepentingan hidup yang utama. Conyers (1991) menyatakan ada tiga kriteria dalam pengertian komunitas, yang pertama mengenai konsep komunitas memiliki komponen-komponen fisik, yang menggambarkan adanya kelompok manusia yang hidup di daerah tertentu dan saling mengadakan interaksi. Kedua yakni terdapat anggota-anggota komunitas pada umumnya memiliki beberapa ciri khas yang sama yang menyebabkan timbulnya identifikasi mereka sebagai sebuah

kelompok. Ketiga, suatu komunitas pada umumnya memiliki keserasian dasar dalam hal perhatian dan aspirasi.

Orang-orang yang terlibat dalam suatu kelompok yang berhubungan dengan lingkungan hidup disuatu wilayah dan budaya yang sama, berdasarkan pada tata kehidupan sehari-hari dan kebiasaan yang sudah ada dalam masyarakat dan nilai-nilai yang berlaku umum itulah yang disebut komunitas lokal. Komunitas lokal memiliki peran yang penting dalam memperkuat ikatan sosial masyarakat, dalam komunitas biasanya terdapat keinginan yang kuat untuk memajukan kepentingan bersama dan mempunyai visi untuk menciptakan kondisi yang lebih baik bagi semua orang yang tinggal dalam suatu komunitas tersebut. Peran tersebut terlihat dalam beberapa aspek di antaranya :

1. **Budaya dan Identitas Lokal**

Pada aspek budaya, sebuah komunitas yang mengawali kegiatannya dari kebanggaan akan identitas lokal dan rasa sadar akan pentingnya melestarikan budaya ditengah arus globalisasi, membuat komunitas ini sadar akan pentingnya sebuah gerakan *cultural survival*. *Cultural survival*, yaitu sebuah konsep penggambaran dari suatu pelaksanaan yang telah berkurang atau kehilangan fungsi pentingnya seratus persen, namun tetap ada di masyarakat, dan berlaku semata-mata hanya karena ada landasan adat-istiadat. Jadi, *cultural survival* adalah suatu cara tradisional yang tak mengalami perubahan sejak dahulu hingga sekarang (Pasaribu, n.d.).

Oleh karena itu, Komunitas lokal memiliki fungsi sebagai penjaga budaya dan warisan lokal. Mereka dapat membantu melestarikan tradisi, cerita rakyat, kesenian, dan menanamkan serta menumbuhkan kembali nilai-nilai budaya yang unik bagi daerah yang menjadi identitas lokal. Hal inilah yang dapat memperkuat dan membangun rasa kebanggaan terhadap tradisi dan adat istiadat budaya dalam masyarakat.

2. **Pendidikan dan Pembelajaran**

Pada aspek pendidikan, masyarakat mampu mendukung jalannya pendidikan dengan melakukan berbagai literasi, pelatihan pendidikan non formal, dan potensial untuk dikembangkan, agar permasalahan yang ada di tingkat paling dasar (*grass roots problem*) mendapatkan solusinya (Fathurrahman & Al Faruq, 2021).

Komunitas lokal memberikan sumber pengetahuan yang berharga dan sarana pembelajaran bagi anggotanya. Contoh komunitas literasi, komunitas guru dan lainnya dapat berperan dalam dunia pendidikan dan pengajaran dengan mengadakan lokakarya, seminar, atau diskusi kelompok tentang topik-topik yang relevan dengan kehidupan sehari-hari, sehingga meningkatkan pemahaman dan keterampilan masyarakat.

3. **Politik dan Hukum**

Dalam dunia politik dan hukum perlu ada sebuah kekuatan yang besar agar penegakan terhadap berbagai aturan dapat dilaksanakan dengan baik. Keberadaan komunitas dalam memperjuangkan kepentingan bersama dalam payung hukum dan politik akan memberikan efek langsung. Contohnya: bersatunya sebuah komunitas, individu-individu dapat mengamplifikasi suara mereka dan memperjuangkan visi bersama. Komunitas lokal sering menjadi kekuatan politik yang signifikan, mempengaruhi kebijakan-kebijakan yang memengaruhi wilayah mereka.

4. **Pemberdayaan Masyarakat**

Kepedulian yang tersirat dan tersurat dari beberapa pemikiran dari masyarakat atau para relawan dalam sebuah komunitas menunjukkan bahwa mereka respon dan mempunyai tindakan nyata terhadap pertumbuhan dan perkembangan daerah. Komunitas lokal memungkinkan individu untuk berpartisipasi aktif dalam masalah-masalah yang mempengaruhi kehidupan sehari-hari mereka. Ini menciptakan kesempatan untuk pemberdayaan masyarakat, di mana warga dapat berkontribusi dalam membuat keputusan yang memengaruhi lingkungan mereka.

5. **Dukungan Sosial**

Komunitas lokal dapat memberikan jaringan dukungan sosial yang kuat bagi anggotanya. Hal ini nampak dari adanya berupa dukungan emosional (solidaritas), dimana para anggota saling memberikan kekuatan atau *support* bagi anggota yang lain. Mereka juga tidak segan-segan memberikan dukungan finansial, atau pelatihan praktis dalam situasi-situasi sulit atau dalam mencapai tujuan tertentu.

Komunitas lokal menjadi wadah yang bermanfaat bagi anggotanya. Adapun hal-hal yang merupakan manfaat penting bagi anggota tempat komunitas tersebut berada, yaitu :

1. Terbangunnya jaringan sosial yang kuat.

Menurut Hajar *et al.* (2019) terdapat empat faktor utama yang mempengaruhi jaringan sosial; yaitu objek atau pihak-pihak yang terlibat dalam jaringan yang terbina, penghubung ikatan jaringan, hubungan peranan, fungsi dan tanggungjawab antara objek/pihak yang terlibat dalam ikatan jaringan, serta arus (*flow*) dan pertukaran (*exchange*) dalam sistem jaringan. Dari keempat faktor tersebut ada dalam sebuah komunitas, sehingga kekuatan jaringan sosial akan lebih terbentuk secara nyata karena hubungan kerjasama dan interaksi dalam lingkup lokal atau lingkungan sekitar.

2. Terbangunnya solidaritas

Kekompakan dan kerjasama merupakan modal dari terbangunnya rasa solidaritas. Komunitas lokal, memungkinkan setiap anggota merasa saling memiliki layaknya saudara satu sama lain karena memiliki kesamaan identitas dan merasa terikat satu sama lain. Solidaritas dapat mendorong terciptanya persatuan dan mampu menyelesaikan masalah-masalah bersama yang dihadapi lingkungan.

3. Memperkuat ekonomi melalui kearifan Lokal

World Bank mendefinisikan *local economic developmet* sebagai proses dimana publik (masyarakat), sektor bisnis dan lembaga nonpemerintah secara bersama mengupayakan konsidi yang lebih baik bagi pertumbuhan ekonomi dan penciptaan lapangan pekerjaan (Putri & Putri, 2022).

Komunitas lokal bergerak sebagai penjaga dari kearifan lokal dan budaya tradisional, mereka memiliki peranan pula dalam meningkatkan ekonomi lokal melalui keterlibatan anggota dan kerjasama dalam berbagai kegiatan ekonomi, sehingga potensi ekonomi dan kearifan lokal dapat tumbuh untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Komunitas lokal sering pula disandingkan dengan beberapa hal yang dapat menandai kekuatan suatu komunitas lokal. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 13.1**.



Gambar 13.1 Ciri Komunitas Lokal
(Sumber: Diolah dari Langgeng, 2023)

Berdasarkan gambar diatas beberapa ciri yang menjadi kekuatan dalam suatu komunitas lokal; **pertama**, adanya kekuatan saling percaya dan menghormati. Kepercayaan terjalin karena adanya ikatan dan saling menghormati perbedaan didalam komunitas tersebut; **kedua**, komunitas memiliki visi dan misi yang jelas. Misi berangkat dari visi komunitas, sehingga mempunyai tujuan yang jelas untuk mencapai kesejahteraan bersama; **ketiga**, adanya penghargaan terhadap keberagaman suku, ras, agama dan lain-lain yang relevan. Keberagaman tersebut tidak dijadikan masalah atau jarak, keberagaman sangat dihargai dan menjadi kekuatan dalam komunitas lokal; **keempat**, keterlibatan aktif anggota kelompok. Anggota selalu hadir dalam acara-acara yang diadakan komunitas dan selalu mengambil peranan di setiap kegiatan dan program komunitas; **kelima**, Penghargaan yang semestinya. Apabila ada anggota yang telah melakukan prestasi dalam suatu komunitas, kemudian mendapat penghargaan dari orang lain/institusi/lembaga atau anggota kelompok yang lain, penghargaan tersebut tidak selalu berupa materi, tetapi dapat berupa ucapan dan salam hormat dari komunitasnya; **keenam**,

keberlanjutan dan perubahan positif. Kekayaan dan budaya lokal disekitar untuk generasi mendatang terus dijaga oleh sebuah komunitas sehingga terjadi perubahan positif demi kesejahteraan bersama.

Oleh karena itu, peran komunitas lokal dapat memberikan dukungan kepada pemerintah dan berbagai pihak terkait dalam pembangunan dan peningkatan kinerja di daerah/lokasi/bidang tertentu (**Gambar 11.2**). Berikut adalah beberapa aktivitas yang sering dilakukan oleh komunitas lokal:

1. **Pendidikan dan literasi**

Komunitas lokal sangat familiar dan literasi di wilayahnya, contohnya ada Akademi Berbagi (Akber) merupakan sebuah wadah komunitas dengan fasilitas kelas belajar gratis dari pengajar praktisi dan para ahli yang mempunyai kompetensi di bidangnya. Selain itu ada komunitas jendela yang berfokus pada pengembangan dan minat baca anak, dengan program unggulan membangun perpustakaan di beberapa kota di Indonesia, dan masih banyak lagi yang lainnya.

2. **Seni dan Budaya**

Kegiatan kesenian dan kebudayaan sering diadakan oleh komunitas lokal, seperti pertunjukan seni tari dengan komunitas tari perempuan menari, musik, wayang, ataupun seni lainnya, komunitas ukulele dan seni tradisional lainnya untuk melestarikan ragam budaya di daerah.

3. **Gotong Royong Lingkungan**

Kegiatan gotong royong adalah kegiatan yang paling umum dilakukan, namun di Kelurahan Cipinang Besar Selatan (CBS) Wadah Komunitas Gotong Royong CBS bukan hanya sebuah wadah, tetapi jadi satu pusat aktivitas positif perkampungan, seperti Kampung Bebas Asap Rokok Pertama di Jakarta, Kampung Warna Warni, Kampung Listrik Indie.

4. **Komunitas Berbagi**

Komunitas lokal sering memiliki program sosial, seperti bantuan sosial, bantuan makanan (sembako), atau sedekah apapun yang sifatnya tidak memaksa namun memiliki tujuan untuk membantu sesama di wilayahnya.

5. **Forum Sosial, Diskusi dan Dialog**

Forum diskusi dan dialog adalah kegiatan yang sering dilaksanakan oleh komunitas lokal, gunanya untuk mencari jalan keluar atas masalah sosial atau lingkungan sekitar.



Gambar 13.2 Peran Komunitas Lokal
(Sumber: Diolah dari Langgeng, 2023)

13.2 Peran Komunitas Lokal Wilayah Pesisir dalam pengelolaan Lingkungan Laut

Potensi kekayaan laut yang besar tidak hanya memberikan manfaat, namun juga menyimpan berbagai permasalahan lingkungan hidup. Eksploitasi sumberdaya alam (SDA) laut dan pesisir terutama pada jenis-jenis SDA laut yang bernilai ekonomis tinggi semakin marak untuk memenuhi *market driven* yakni kebutuhan pasar domestik dan luar negeri. Kondisi tersebut tidak jarang memberikan dampak negatif karena cenderung bersifat destruktif seperti illegal fishing dan kelebihan tangkap (*over fishing*) di sektor perikanan, pencemaran limbah dan sampah, perusakan hutan mangrove, kerusakan terumbu karang dan padang lamun serta abrasi pantai dan gelombang pasang hingga masalah lainnya seperti gempa, banjir dan lain-lain.

Beberapa penyebab terjadinya masalah tersebut, dominan karena penangkapan ikan dengan cara yang salah. Pertama kurangnya pembinaan tentang bagaimana cara pengelolaan sumber daya kelautan yang baik dan benar. Kedua, tidak adanya pengontrolan dari pihak-pihak yang berwenang. Ketiga, kurangnya pengetahuan masyarakat nelayan tentang pentingnya menjaga kelestarian alam laut. Keempat, oknum aparat diduga terlibat langsung dalam kegiatan *Illegal Fishing* tersebut. (Devy & Rahmi, 2019)

Beberapa permasalahan ini tentunya tidak bisa langsung ditangani oleh pemerintah, perlu peran serta masyarakat khususnya

masyarakat pesisir, komunitas lokal ataupun komunitas pencinta laut. Kumpulan individu atau kumpulan manusia yang menggantungkan hidupnya di wilayah pesisir, serta memiliki pemahaman mendalam tentang lingkungan laut dan secara langsung terlibat dalam kehidupan sehari-hari di laut. Mereka seringkali menjadi mata dan telinga pertama yang mengetahui perubahan-perubahan signifikan dalam lingkungan mereka, baik itu penurunan populasi ikan, pencemaran, atau perubahan suhu air. Oleh karena itu, mereka berperan penting dalam pengawasan dan pemantauan lingkungan ruang laut.

Pengawasan dan pengendalian terhadap pesisir dan kelautan (Danial, 2012) dapat dijalankan sebagai :

1. upaya mengetahui adanya kekeliruan dalam menjalankan renstra, rencana zonasi, rencana pengelolaan, serta implikasi penyimpangan pada perubahan kualitas ekosistem pesisir;
2. kegiatan menstimulus pemanfaatan sumberdaya pesisir dan kelautan sesuai dengan rencana awal dan monitoring pengelolaannya;
3. pemberian sanksi pada pelaku yang melanggar, berupa sanksi administrasi atau sanksi pidana berupa penahanan atau kurungan.
4. dasar hukum tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan kelautan ini merupakan landasan penyesuaian dengan ketentuan yang tercantum dalam peraturan perundang-undangan yang lain.

13.3 Peran Komunitas sebagai Agen konservasi Lingkungan Laut

Berkaca dari dampak kerusakan ekosistem laut yang terjadi, pemerintah berinisiatif agar pengelolaan laut, yakni memperhatikan perlindungan lingkungan laut dan keberlanjutan ekosistem laut. Upaya yang dilakukan adalah dengan mencetuskan program ekonomi biru. Ekonomi biru merupakan program yang memiliki tujuan agar pemanfaatan sumber daya laut tetap memperhatikan kelestarian lingkungan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi demi kesejahteraan masyarakat dengan pendekatan keberlanjutan. Implementasi kebijakan tersebut didukung Peraturan Pemerintah Nomor 11 Tahun 2023 dan Peraturan Pemerintah No 26 Tahun 2023. Adapun program prioritas Ekonomi Biru yang dicanangkan dapat dilihat pada Tabel 13.1 dan **Gambar 13.3**.

Tabel 13.1 Tujuan Program Prioritas Ekonomi Biru

No	Program	Tujuan
1.	Perluasan konservasi laut	Meningkatkan perlindungan habitat penting untuk pemijahan ikan dan menjaga fungsi laut dalam menyerap CO ₂ dan memproduksi O ₂
2.	Penangkapan ikan secara terukur berbasis kuota	Menjaga keberlanjutan sumber daya ikan, meningkatkan pertumbuhan ekonomi wilayah, dan meningkatkan kesejahteraan nelayan
3.	Pengembangan perikanan budidaya di laut, pesisir dan darat yang berkelanjutan	Mengurangi tekanan sumber daya ikan di laut, memenuhi kebutuhan protein masyarakat dan pasar ekspor berbasis komoditas unggulan
4.	Pengawasan dan pengendalian pesisir dan pulau-pulau kecil	Mengurangi tekanan/dampak negatif kegiatan manusia, melestarikan dan menjaga kualitas ekosistem pesisir dan pulau-pulau kecil
5.	Pembersihan sampah plastik di Laut	Melalui grakan partisipasi nelayan untuk menjaga laut agar tetap bersih sehingga ekosistem laut menjadi sehat

(Sumber : Trenggono, 2023)



Gambar 13.3 Kebijakan Ekonomi Biru

(Sumber : Trenggono, 2023)

Program utama yang menjadi prioritas ekonomi biru, adalah masalah perluasan kawasan konservasi. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Sukomardojo *et al.* (2023), mengungkapkan bahwa komunitas pesisir memiliki peran sentral sebagai agen konservasi lingkungan, hal ini dipicu oleh adanya keterhubungan mereka dengan ekosistem laut dan pantai serta budaya dan tradisi lokal yang mendukung pelestarian. Inisiatif berbasis masyarakat, seperti pengelolaan sumber daya perikanan, pelestarian habitat dan pendidikan lingkungan, memiliki daya dukung baik yang dapat mengubah perilaku konservasi, disisi yang lain keberhasilan tersebut tergantung pada seberapa aktif masyarakat dan dukungan pemerintah. Selain itu, transfer pengetahuan antar komunitas pesisir merupakan alat penting dalam meningkatkan kapasitas adaptasi dan konservasi.

Efektivitas pengelolaan kawasan konservasi dapat dievaluasi berdasarkan berbagai aspek. Dalam pengelolaan konservasi, enam elemen penting diidentifikasi untuk mengukur efektivitas pengelolaan:

1. Pengelolaan dimulai dengan pemahaman komprehensif tentang kawasan lindung, yang mencakup nilai-nilai yang terkandung di dalamnya, tantangan yang dihadapi, peluang yang ada, pemangku kepentingan, serta konteks pengelolaan dan politik yang lebih luas.
2. Pengembangan strategi pengelolaan dimulai melalui proses perencanaan yang meliputi penetapan visi, tujuan, sasaran, dan strategi yang jelas yang bertujuan untuk melestarikan nilai-nilai kawasan dan memitigasi ancaman.
3. Alokasi sumber daya, termasuk sumber daya personel, keuangan, dan peralatan, sangat penting untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan.
4. Penerapan tindakan pengelolaan mengikuti proses yang diterima dan ditentukan dengan baik.
5. Keluaran, biasanya didefinisikan dalam pengelolaan dan rencana kerja, berupa? barang dan jasa yang dihasilkan sebagai hasil upaya pengelolaan.
6. Tujuan akhirnya adalah menghasilkan dampak atau outcome, dengan harapan dapat mewujudkan tujuan dan sasaran yang telah ditetapkan (Dzakirizq & Nugroho, 2023).

Komunitas lokal dapat memanfaatkan peluang secara ekonomi dan berkomitmen terhadap konservasi dan Pembangunan berkelanjutan. Selanjutnya, hal ini akan meningkatkan kesejahteraan masyarakat lokal dan memberikan manfaat ekonomi secara berkelanjutan. (Chan *et al.*, 2021). Cara-cara yang dapat dilakukan komunitas lokal dalam upaya konservasi, misalnya:

1. Komunitas lokal atau pesisir memiliki budaya atau adat ritual yang diturunkan dari generasi ke generasi untuk menjaga ekosistem, adanya hukum adat yang menjaga kelestarian tersebut dan adanya sanksi adat bagi pelaku yang tidak memenuhi aturan adat.
2. Komunitas melakukan praktik konservasi sumber daya laut berdasarkan kesepakatan bersama, berupa sosialisasi antar anggota masyarakat, penyuluhan dan pelatihan mengenai kelestarian dan keberlanjutan ekosistem laut.
3. Komunitas dapat merancang perencanaan edukasi laut dan melakukan tindakan pencegahan terhadap pengambilan atau eksploitasi berlebihan terhadap ekosistem laut.
4. Membentuk ikatan emosional dan memotivasi masyarakat untuk menjaga dan merawat lingkungan dengan penuh rasa tanggung jawab. Pendidikan dan kesadaran tentang pentingnya menjaga keberlanjutan lingkungan laut, komunitas dapat memotivasi individu untuk mengambil tindakan konservasi, seperti pengurangan penggunaan plastik, penggunaan teknik penangkapan ikan yang berkelanjutan, dan melindungi habitat laut.
5. Komunitas lokal dapat berkontribusi dalam pengumpulan data dan penelitian mengenai lingkungan ruang laut. Dengan pengetahuan tradisional mereka yang diturunkan dari generasi ke generasi, mereka dapat memberikan wawasan yang berharga tentang dinamika ekologi, migrasi spesies, dan pola cuaca laut yang mungkin sulit diakses oleh peneliti profesional. Dengan mendorong partisipasi komunitas dalam penelitian ilmiah, informasi yang dikumpulkan dapat menjadi dasar untuk kebijakan pengelolaan yang lebih efektif.
6. Komunitas lokal dapat membangun pola kerjasama dengan pemerintah, dan organisasi non-pemerintah atas inisiatif konservasi lokal sehingga kegiatan keberlanjutan atau pelestarian lingkungan dapat dikembangkan. Hal ini dapat mencakup pembentukan

kawasan konservasi, pengelolaan taman laut, atau program perlindungan spesies terancam di lingkungan mereka. Komunitas lokal dapat menjadi garda terdepan dalam menggalang dukungan dan menjalankan program-program ini.

7. Komunitas lokal juga dapat terlibat dalam penegakan hukum untuk melindungi sumber daya laut dari aktivitas ilegal seperti penangkapan ikan berlebihan, penambangan liar, atau pencemaran. Mereka dapat bekerja sama dengan pihak berwenang untuk memantau dan melaporkan pelanggaran serta memastikan bahwa aturan pengelolaan laut dipatuhi.

13.4 Kesimpulan

Peran komunitas lokal dalam pengelolaan lingkungan ruang laut sangat penting dan multidimensional. Dengan pemahaman yang mendalam tentang lingkungan mereka dan keterlibatan langsung dalam kehidupan sehari-hari di laut. Upaya untuk memperkuat peran komunitas lokal dalam pengelolaan lingkungan ruang laut harus didukung dan ditingkatkan. Komunitas lokal dapat memainkan peran aktif dalam melaksanakan program-program konservasi laut, seperti menjaga kawasan konservasi, mengelola taman laut, atau mengawasi penangkapan ikan yang berkelanjutan dan mendorong tindakan-tindakan konservasi, seperti mengurangi sampah plastik atau memelihara ekosistem laut. Selain itu, mereka juga dapat berperan dalam pengembangan keterampilan dan usaha ekonomi yang berkelanjutan, seperti pariwisata ekowisata atau pengelolaan budidaya laut, yang dapat membantu mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam.

Bab 14

TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PELESTARIAN LINGKUNGAN RUANG LAUT

14.1 Teknologi Pemantauan Lingkungan Laut

Teknologi pemantauan lingkungan laut merupakan kumpulan metode dan alat canggih yang digunakan untuk mengamati, mengukur, dan menganalisis kondisi fisik, kimia, biologis, dan ekologis dari ekosistem laut (Danovaro *et al.*, 2016). Ini mencakup penggunaan satelit untuk pemantauan luas wilayah seperti suhu permukaan laut, konsentrasi klorofil, dan penyebaran alga berbahaya; sensor dan buoy yang ditempatkan di bawah air untuk mengumpulkan data tentang kualitas air, arus, dan suhu di kedalaman berbeda; ROV (*Remotely Operated Vehicles*) dan AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) untuk eksplorasi dan penelitian bawah air tanpa harus mengirim manusia ke kedalaman berbahaya; serta pengembangan sistem informasi geografis (GIS) dan pemodelan untuk analisis data dan prediksi perubahan lingkungan (Bogue, 2015). Teknologi ini memainkan peran kunci dalam upaya pelestarian lingkungan laut, memungkinkan deteksi dini perubahan lingkungan, pemantauan keberlanjutan sumber daya laut, dan penanganan masalah seperti polusi dan perubahan iklim.

14.1.1 Satelit Pemantauan Laut

Satelit pemantauan laut adalah satelit buatan yang dirancang khusus untuk mengamati dan mengumpulkan data tentang lautan dan permukaannya dari orbit bumi (Lin & Yang, 2020). Teknologi ini memungkinkan para ilmuwan dan peneliti untuk memetakan topografi dasar laut, mengukur suhu permukaan laut, mengidentifikasi pola arus laut, memantau konsentrasi klorofil untuk menilai produktivitas biologis,

serta mendeteksi dan melacak penyebaran polusi dan bunga alga berbahaya. Satelit pemantauan laut dilengkapi dengan berbagai instrumen, termasuk kamera beresolusi tinggi, radar, dan sensor yang dapat menembus awan dan mengumpulkan data di sepanjang spektrum gelombang elektromagnetik (Fu *et al.*, 2020).

Contoh satelit pemantauan laut yang terkenal adalah satelit Aqua dan Terra dari NASA. Satelit Aqua, diluncurkan pada tahun 2002, merupakan bagian dari program *Earth Observing System* (EOS) NASA dan membawa enam instrumen yang mengumpulkan data tentang permukaan laut, atmosfer, radiasi, siklus air, dan perubahan iklim. Aqua berperan penting dalam memahami proses evaporasi laut, siklus air, serta dinamika atmosfer. Sementara itu, Terra, yang diluncurkan pada tahun 1999, juga merupakan bagian dari EOS dan dilengkapi dengan lima instrumen ilmiah yang dirancang untuk memantau lingkungan bumi, termasuk lautan. Terra memberikan data penting tentang fenomena seperti El Niño, penyebaran aerosol, dan degradasi lingkungan laut.

Selain itu, satelit Copernicus Sentinel-3, yang merupakan bagian dari program Copernicus Uni Eropa, khusus dirancang untuk pemantauan lingkungan laut. Sentinel-3 memiliki alat ukur yang canggih seperti *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI), *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR), dan *SAR Radar Altimeter*, yang bersama-sama memberikan data penting untuk pengelolaan laut dan pemantauan perubahan iklim. Instrumen-instrumen ini mengumpulkan informasi tentang warna laut, suhu permukaan laut, dan topografi laut, yang mendukung berbagai aplikasi termasuk pengelolaan perikanan, pemantauan polusi laut, dan penelitian iklim.

Melalui penggunaan satelit pemantauan laut, kita dapat mengumpulkan data komprehensif tentang ekosistem laut kita dengan cakupan yang luas dan dalam waktu yang *real-time*, membantu para ilmuwan, pembuat kebijakan, dan pemangku kepentingan lainnya dalam mengambil tindakan yang tepat untuk pelestarian dan pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan (Benway *et al.*, 2019).

14.1.1.1 Penggunaan Satelit dalam Memantau Kualitas Air dan Kesehatan Terumbu Karang

Penggunaan satelit dalam memantau kualitas air dan kesehatan terumbu karang adalah pendekatan revolusioner yang memanfaatkan teknologi canggih untuk mengawasi dan melindungi ekosistem laut yang rentan ini (Gambín *et al.*, 2021). Melalui instrumen yang terpasang pada satelit, peneliti dapat mengumpulkan data tentang suhu permukaan laut, klorofil, kekeruhan, serta kandungan mineral dan organik dalam air. Informasi ini sangat penting karena kualitas air yang buruk dan perubahan suhu dapat mengakibatkan pemutihan terumbu karang dan mempengaruhi kesehatan keseluruhan ekosistem laut.

Salah satu contoh satelit yang digunakan untuk tujuan ini adalah satelit Landsat, yang dioperasikan oleh NASA dan *US Geological Survey*. Program Landsat, yang sudah berjalan sejak tahun 1972, menyediakan data berharga tentang perubahan lingkungan global, termasuk perubahan dalam ekosistem laut dan terumbu karang. *Landsat 8*, misalnya, membawa *Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), yang keduanya dapat digunakan untuk mengamati kualitas air dan mengidentifikasi area-area terumbu karang yang mengalami tekanan lingkungan (Adjovu *et al.*, 2023).

Contoh lainnya adalah satelit Aqua dari NASA, yang membawa alat *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). MODIS mengumpulkan data dalam berbagai spektrum cahaya, yang memungkinkan peneliti untuk mengamati fenomena seperti pemutihan terumbu karang, pertumbuhan alga, dan sedimentasi. Data ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi area terumbu karang yang memerlukan perlindungan atau restorasi (Purkis, 2018).

Satelit Sentinel-2, bagian dari program Copernicus Uni Eropa, juga memberikan gambar beresolusi tinggi yang dapat digunakan untuk memantau kesehatan terumbu karang. Dengan kemampuan untuk mengamati dalam berbagai panjang gelombang, termasuk dekat inframerah, Sentinel-2 dapat mendeteksi variasi dalam vegetasi, sedimentasi, dan kualitas air di sekitar terumbu karang (Hedley *et al.*, 2018).

Teknologi satelit memungkinkan pemantauan terumbu karang dan kualitas air di skala global dengan biaya yang relatif rendah

dibandingkan dengan metode survei lapangan. Hal ini sangat penting mengingat terumbu karang adalah ekosistem yang sangat penting tetapi rentan, yang menyediakan habitat bagi ribuan spesies laut dan mendukung kehidupan jutaan orang. Dengan informasi yang diperoleh dari satelit, para peneliti dan pengelola lingkungan dapat mengambil tindakan yang lebih tepat untuk melindungi dan melestarikan terumbu karang untuk generasi yang akan datang.

14.1.1.2 Teknologi Satelit dalam Mendeteksi Pencemaran Minyak

Teknologi satelit memainkan peran krusial dalam mendeteksi dan memantau pencemaran minyak di lautan, yang merupakan salah satu ancaman paling serius terhadap lingkungan maritim (Lavrova *et al.*, 2017). Dengan menggunakan berbagai instrumen dan sensor yang dipasang pada satelit, para ilmuwan dapat mengidentifikasi tumpahan minyak, memantau pergerakannya, dan mengevaluasi dampaknya terhadap ekosistem laut. Teknologi ini menyediakan cara yang cepat dan efisien untuk mengumpulkan informasi luas seputar insiden pencemaran, yang sangat penting untuk upaya respons dan pembersihan.

Satelit yang dilengkapi dengan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) sangat efektif dalam mendeteksi tumpahan minyak di permukaan laut (Huang *et al.*, 2022). SAR adalah jenis radar yang mampu menghasilkan gambar beresolusi tinggi dari permukaan bumi, termasuk permukaan laut, di bawah segala kondisi cuaca dan cahaya. Ini karena SAR bekerja dengan memancarkan gelombang mikro sendiri dan kemudian menerima dan mengolah pantulan gelombang tersebut untuk menghasilkan gambar. Tumpahan minyak dapat diidentifikasi dalam gambar SAR karena minyak di permukaan laut mengubah kekasaran permukaan, yang mengurangi pantulan kembali gelombang radar, sehingga tumpahan minyak tampak lebih gelap dibandingkan dengan air laut di sekitarnya.

Contoh penggunaan teknologi SAR dalam mendeteksi pencemaran minyak adalah melalui satelit Sentinel-1, yang merupakan bagian dari program Copernicus yang dikelola oleh Uni Eropa. Sentinel-1 membawa SAR canggih yang dapat digunakan untuk memantau lautan dan mendeteksi tumpahan minyak dengan efektif. Gambar yang dihasilkan oleh SAR pada Sentinel-1 telah digunakan dalam berbagai

insiden pencemaran untuk membantu menentukan lokasi dan luas tumpahan, sehingga mempercepat respons pembersihan.

Selain SAR, beberapa satelit juga dilengkapi dengan sensor optik dan inframerah yang dapat mendeteksi perubahan pada permukaan laut yang disebabkan oleh tumpahan minyak. Misalnya, satelit MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) pada satelit Terra dan Aqua milik NASA dapat mendeteksi perubahan warna permukaan laut yang disebabkan oleh pencemaran minyak.

Penggunaan teknologi satelit dalam mendeteksi pencemaran minyak memberikan banyak keuntungan, termasuk kemampuan untuk memantau area luas secara terus-menerus dan mengumpulkan data tanpa terpengaruh oleh kondisi cuaca atau cahaya. Ini sangat penting dalam upaya pengelolaan dan mitigasi dampak lingkungan dari tumpahan minyak, memungkinkan para pemangku kepentingan untuk merespons dengan cepat dan efektif dalam menghadapi insiden pencemaran.

14.1.2 Sensor dan Alat Pemantau Bawah Air

14.1.2.1 Pengembangan Sensor untuk Memantau Parameter Kualitas Air

Pengembangan sensor untuk memantau parameter kualitas air merupakan bidang yang terus berkembang, mengingat pentingnya memastikan kualitas air dalam mendukung kehidupan dan menjaga kesehatan ekosistem (Adu-Manu *et al.*, 2017). Sensor ini dirancang untuk mengukur berbagai parameter yang menunjukkan kondisi kualitas air, seperti pH, suhu, kekeruhan, konsentrasi oksigen terlarut, klorofil, nutrien (nitrat, fosfat), logam berat, dan kontaminan organik. Pemantauan parameter ini sangat penting untuk deteksi dini masalah kualitas air, penilaian dampak lingkungan, dan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan.

Contoh sensor dan teknologi pemantauan kualitas air:

- 1) Sensor pH: Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air. pH merupakan indikator penting dari keseimbangan kimia air dan dapat mempengaruhi kehidupan organisme dalam air.
- 2) Sensor Oksigen Terlarut (DO): Sensor ini mengukur konsentrasi oksigen terlarut dalam air, yang esensial untuk kehidupan ikan dan

- organisme akuatik lainnya. Penurunan tingkat DO dapat mengindikasikan polusi organik dan masalah kualitas air.
- 3) Sensor Kekeruhan: Kekeruhan air diukur menggunakan sensor yang mendeteksi partikel tersuspensi. Tingkat kekeruhan yang tinggi dapat mengurangi penetrasi cahaya dalam air, mengganggu fotosintesis, dan mempengaruhi ekosistem akuatik.
 - 4) Sensor Nutrien: Sensor ini mengukur konsentrasi nutrien seperti nitrat dan fosfat, yang peningkatannya dapat menyebabkan eutrofikasi, pertumbuhan berlebihan alga, dan penurunan kualitas air.
 - 5) Sensor Logam Berat: Teknologi seperti spektroskopi massa dengan plasma terkopel induktif (ICP-MS) digunakan untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi logam berat di air, yang dapat beracun bagi kehidupan akuatik dan manusia.
 - 6) Fluorometer: Alat ini digunakan untuk mengukur konsentrasi klorofil dan senyawa organik lainnya dengan mendeteksi fluoresensi. Ini penting untuk memantau pertumbuhan fitoplankton dan kualitas air secara keseluruhan.

14.1.2.2 Implementasi Teknologi Sensor Modern

Pengembangan teknologi sensor terbaru mengarah pada penciptaan sensor yang lebih kecil, lebih efisien, dan mampu mengirim data secara *real-time* melalui jaringan nirkabel (Kandris *et al.*, 2020). Misalnya, penggunaan *Internet of Things* (IoT) dalam pemantauan kualitas air memungkinkan integrasi berbagai sensor ke dalam satu sistem yang terkoneksi dan dapat dipantau dari jarak jauh. Hal ini memungkinkan pemantauan kualitas air secara terus-menerus dan *real-time*, yang sangat meningkatkan kemampuan untuk merespon cepat terhadap perubahan kualitas air.

Satu contoh implementasi teknologi sensor modern adalah proyek Smart Water Management. Dalam proyek ini, sensor kualitas air dipasang di berbagai titik di sungai, danau, atau reservoir untuk mengumpulkan data tentang parameter kualitas air secara *real-time*. Data ini kemudian dikirim ke pusat pengendalian melalui jaringan nirkabel, memungkinkan para pengelola sumber daya air untuk mengambil keputusan berbasis data dalam mengelola sumber daya air.

Pengembangan sensor untuk pemantauan kualitas air tidak hanya memberikan data yang lebih akurat dan tepat waktu tetapi juga membuka jalan untuk inovasi dalam pengelolaan dan perlindungan sumber daya air. Dengan teknologi sensor yang semakin canggih, kita dapat lebih efektif dalam mendeteksi dan mengatasi masalah kualitas air sebelum mereka menjadi masalah yang lebih besar.

14.1.3 Penggunaan ROV (*Remotely Operated Vehicles*) dalam Penelitian Lingkungan Bawah Air

ROV (*Remotely Operated Vehicles*) adalah kendaraan bawah air yang dikontrol dari jarak jauh dan digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk penelitian lingkungan bawah air (Petillot *et al.*, 2019). ROV menyediakan sarana untuk mengakses lingkungan bawah air yang sulit atau berbahaya bagi penyelam manusia, memungkinkan penelitian dan pemantauan lingkungan laut dengan lebih aman dan efisien.

Aplikasi ROV dalam penelitian lingkungan bawah air:

1. Pemetaan Dasar Laut: ROV dilengkapi dengan sonar, kamera, dan instrumen lain untuk memetakan dasar laut secara detail. Pemetaan ini penting untuk memahami topografi, habitat, dan proses geologis bawah laut, yang dapat mempengaruhi keanekaragaman hayati dan dinamika ekosistem.
2. Pemantauan Kesehatan Terumbu Karang: ROV digunakan untuk memantau kondisi terumbu karang, termasuk dampak pemanasan global, asidifikasi laut, dan kegiatan manusia. Dengan kamera dan alat pengambil sampel, ROV dapat mengumpulkan data visual dan fisik secara langsung dari terumbu karang tanpa mengganggu ekosistemnya.
3. Penelitian Biodiversitas Laut: Menggunakan ROV, peneliti dapat menjelajahi lingkungan laut dalam yang sebelumnya tidak terjangkau untuk mengidentifikasi spesies baru dan memahami pola distribusi kehidupan laut. Hal ini membantu dalam upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya laut.
4. Pengawasan Pencemaran: ROV digunakan untuk mendeteksi dan memantau tumpahan minyak, limbah kimia, dan sumber pencemaran lainnya di bawah air. Dengan kemampuan untuk

mengambil sampel air atau sedimen, ROV dapat membantu dalam penilaian dampak dan upaya pemulihan lingkungan.

5. Pengamatan Fenomena Bawah Laut: Termasuk pengamatan aktivitas vulkanik bawah laut, aliran hidrotermal, dan fenomena geologis lainnya. ROV memungkinkan penelitian langsung terhadap fenomena ini, yang penting untuk memahami proses geologis Bumi dan dampaknya terhadap iklim global dan ekosistem laut.

Contoh penggunaan ROV:

- Proyek Penelitian Laut Dalam *Okeanos Explorer* NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) menggunakan ROV dalam ekspedisi *Okeanos Explorer* untuk menjelajahi laut dalam yang belum dipetakan. ROV *Deep Discoverer*, misalnya, memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan data visual dan fisik dari kedalaman hingga 6.000 meter, mengungkap spesies baru dan fitur geologis yang belum pernah dilihat sebelumnya.
- Pemantauan Terumbu Karang di *Great Barrier Reef*: Penggunaan ROV untuk memantau kondisi terumbu karang di *Great Barrier Reef*, Australia, membantu peneliti dalam mengumpulkan data tentang dampak perubahan iklim dan aktivitas manusia terhadap terumbu ini. ROV menyediakan gambaran langsung tentang kondisi terumbu dan membantu dalam penilaian kesehatan terumbu secara keseluruhan.
- Penelitian di Laut Hitam: ROV digunakan dalam penelitian di Laut Hitam untuk mempelajari fenomena anoksia (kekurangan oksigen) yang mempengaruhi ekosistem laut dalam. Dengan ROV, peneliti dapat mengambil sampel air dan sedimen dari lingkungan anoksik untuk analisis lebih lanjut, memberikan wawasan tentang dampak anoksia terhadap kehidupan laut dan siklus biogeokimia.

Penggunaan ROV dalam penelitian lingkungan bawah air membuka kemungkinan baru dalam pemahaman kita tentang laut dan membantu dalam upaya konservasi dan pengelolaan lingkungan laut (Macreadie *et al.*, 2018). Dengan kemampuan untuk menjelajahi kedalaman yang belum pernah dijangkau sebelumnya, ROV berperan vital dalam memperluas pengetahuan kita tentang planet ini.

14.1.4 Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Pemodelan

14.1.4.1 Penerapan SIG dalam Manajemen Zona Pesisir

Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah teknologi penting yang digunakan dalam manajemen zona pesisir, memungkinkan integrasi, analisis, dan visualisasi data spasial untuk mendukung pengambilan keputusan yang efektif (Yasir *et al.*, 2020). Dengan menggunakan SIG, pengelola zona pesisir dapat memetakan dan memonitor lingkungan, merencanakan penggunaan lahan, dan merespons terhadap perubahan lingkungan dengan cara yang lebih terinformasi dan berkelanjutan.

Penerapan SIG dalam Manajemen Zona Pesisir:

- a) **Pemetaan dan Inventarisasi:** SIG digunakan untuk membuat peta dasar yang akurat dari zona pesisir, termasuk topografi, habitat, penggunaan lahan, dan infrastruktur. Informasi ini penting untuk perencanaan penggunaan lahan, konservasi habitat, dan pengembangan berkelanjutan.
- b) **Analisis Kerentanan:** Dengan SIG, dapat dilakukan analisis kerentanan zona pesisir terhadap ancaman seperti erosi, kenaikan permukaan laut, dan bencana alam. Hal ini membantu dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi dan adaptasi untuk melindungi komunitas dan ekosistem pesisir.
- c) **Manajemen Sumber Daya:** SIG mendukung pengelolaan sumber daya alam di zona pesisir, seperti perikanan, mangrove, dan terumbu karang. Analisis SIG dapat membantu dalam penentuan area konservasi, zonasi untuk penggunaan berkelanjutan, dan monitoring dampak aktivitas manusia.
- d) **Perencanaan Tata Ruang:** Dengan SIG, perencana dapat mengintegrasikan berbagai data untuk membuat rencana tata ruang yang mempertimbangkan pelestarian lingkungan, pengembangan ekonomi, dan kebutuhan sosial. SIG memungkinkan simulasi skenario berbeda untuk mengevaluasi dampak dari berbagai opsi perencanaan.
- e) **Respons Bencana dan Mitigasi:** SIG digunakan untuk perencanaan respons bencana, seperti banjir dan tsunami, dengan memetakan area berisiko dan merencanakan rute evakuasi. SIG juga mendukung upaya mitigasi dengan memonitor perubahan lingkungan yang dapat meningkatkan risiko bencana.

Contoh Penerapan SIG:

- Manajemen Mangrove di Indonesia: Indonesia, dengan salah satu ekosistem mangrove terbesar di dunia, menggunakan SIG untuk memetakan dan memonitor kondisi mangrove. SIG membantu dalam identifikasi area yang terdegradasi, perencanaan rehabilitasi mangrove, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.
- Perencanaan Zona Pesisir di California, AS: Program Manajemen Zona Pesisir California menggunakan SIG untuk integrasi data lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam perencanaan penggunaan lahan dan manajemen sumber daya. Hal ini termasuk pengembangan area rekreasi, perlindungan habitat, dan mitigasi bahaya alam.
- Monitoring Erosi Pantai di Australia: Pemerintah Australia menggunakan SIG dalam proyek monitoring erosi pantai, memetakan perubahan garis pantai sepanjang waktu dan menganalisis data untuk merencanakan langkah-langkah perlindungan pantai, seperti pembangunan terumbu buatan atau pemulihan vegetasi pesisir.

Penerapan SIG dalam manajemen zona pesisir menawarkan pendekatan holistik yang mempertimbangkan berbagai aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Teknologi ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih terinformasi, mendukung upaya konservasi, dan membantu dalam pengembangan berkelanjutan zona pesisir.

14.1.4.2 Model Prediktif untuk Mengantisipasi Erosi Pantai dan Kenaikan Permukaan Air Laut

Model prediktif dalam konteks mengantisipasi erosi pantai dan kenaikan permukaan air laut merupakan alat penting dalam pengelolaan pesisir dan adaptasi terhadap perubahan iklim (Sahin *et al.*, 2019). Model-model ini menggunakan data historis dan proyeksi untuk memperkirakan bagaimana garis pantai, ekosistem, dan infrastruktur dapat terpengaruh di masa depan, memungkinkan pembuatan kebijakan dan langkah-langkah adaptasi yang lebih efektif.

Komponen Model Prediktif:

- a) Data Historis dan Observasi: Data tentang perubahan garis pantai, tinggi muka air laut, pola cuaca, dan aktivitas manusia di pesisir.

- b) Proyeksi Perubahan Iklim: Menggunakan model iklim global (GCMs) untuk memperkirakan perubahan suhu, curah hujan, dan kenaikan permukaan air laut.
- c) Model Hidrodinamik dan Sedimentasi: Untuk memperkirakan pergerakan air dan sedimentasi di daerah pesisir, mempengaruhi erosi dan akresi.
- d) Model Ekosistem: Mengestimasi bagaimana ekosistem pesisir seperti mangrove, terumbu karang, dan padang lamun dapat terpengaruh oleh perubahan kondisi.
- e) Simulasi Skenario: Berbagai skenario dikembangkan berdasarkan kemungkinan intervensi manusia dan kebijakan adaptasi, serta proyeksi perubahan iklim.

Aplikasi Model Prediktif:

- a) Perencanaan Adaptasi: Membantu pembuat kebijakan dalam merancang infrastruktur pesisir, seperti dinding laut atau penghalang hidup (misalnya penanaman mangrove), untuk melindungi wilayah pesisir dari erosi dan banjir.
- b) Penentuan Zonasi Pesisir: Model prediktif dapat digunakan untuk menentukan area mana yang paling berisiko mengalami erosi atau banjir, membantu dalam penentuan zona pembangunan, konservasi, atau zona yang memerlukan relokasi.
- c) Manajemen Sumber Daya: Mengidentifikasi dampak perubahan iklim terhadap sumber daya pesisir, seperti perikanan, dan merencanakan strategi manajemen yang berkelanjutan.
- d) Evaluasi Risiko dan Asuransi: Model prediktif digunakan dalam industri asuransi untuk menilai risiko terkait perubahan iklim dan merumuskan polis asuransi yang sesuai.

Contoh Implementasi:

- Proyek BRICK (*Building Resilience through Innovation, Communication, and Knowledge*) di Bangladesh menggunakan model prediktif untuk memperkirakan dampak kenaikan permukaan air laut dan erosi pantai pada infrastruktur dan pemukiman di pesisir, membantu dalam perencanaan adaptasi dan relokasi masyarakat yang berisiko.
- *The Coastal Adaptation Study* di Massachusetts, USA, menggunakan model prediktif untuk menilai risiko yang ditimbulkan oleh kenaikan permukaan air laut dan perubahan iklim terhadap infrastruktur

pesisir, termasuk bandara dan jaringan transportasi, dan merancang strategi adaptasi.

Penggunaan model prediktif dalam mengantisipasi erosi pantai dan kenaikan permukaan air laut memungkinkan pembuat kebijakan dan manajer pesisir untuk merencanakan dan mengimplementasikan strategi adaptasi yang efektif, mengurangi kerugian ekonomi dan dampak sosial dari perubahan iklim.

14.2 Teknologi dalam Konservasi Biota Laut

14.2.1 Teknologi Pembibitan dan Pemulihan Populasi

Teknik pembiakan buatan untuk spesies yang terancam punah merupakan salah satu strategi konservasi yang penting (Herrick, 2019). Teknik ini melibatkan intervensi manusia untuk mendukung reproduksi spesies yang menghadapi kesulitan berkembang biak secara alami di habitatnya karena berbagai alasan seperti perusakan habitat, perubahan iklim, atau tekanan pemburuan. Pembiakan buatan dapat dilakukan melalui berbagai metode termasuk inseminasi buatan, fertilisasi in vitro, dan teknologi reproduksi asistensi lainnya.

Teknik dan Metode Pembiakan Buatan:

1. Inseminasi Buatan (*Artificial Insemination* - AI): Sperma yang dikumpulkan dari jantan disuntikkan ke dalam saluran reproduksi betina. Teknik ini memungkinkan genetik dari individu jantan yang berharga untuk dipertahankan dan disebarluaskan tanpa perlu transportasi hewan jantan ke lokasi betina, mengurangi stres dan risiko yang terkait dengan transportasi.
2. *Fertilisasi In Vitro* (IVF): Ovum (telur) yang diambil dari betina difertilisasi di laboratorium dengan sperma dari jantan. Embrio yang dihasilkan kemudian ditanamkan kembali ke dalam rahim betina atau betina pengganti. IVF berguna untuk spesies yang mengalami kesulitan dalam kawin alami atau memiliki tingkat keberhasilan fertilisasi yang rendah.
3. Transfer Embrio: Embrio yang telah dibuahi ditempatkan dalam rahim betina pengganti dari spesies yang sama atau spesies yang serupa. Teknik ini membantu meningkatkan jumlah individu yang lahir dari spesies yang terancam punah.

4. Kriopreservasi: Sel sperma, ovum, dan embrio dapat dibekukan dan disimpan untuk jangka waktu yang lama. Kriopreservasi memungkinkan pelestarian materi genetik yang dapat digunakan untuk program pembiakan di masa depan.

Contoh Aplikasi:

- Panda Besar: Program pembiakan buatan telah berhasil meningkatkan populasi panda yang dulunya terancam punah. Melalui inseminasi buatan dan pengelolaan genetik yang cermat, populasi panda di alam liar dan di penangkaran telah bertambah.
- Badak Sumatera: Dengan sangat sedikit individu yang tersisa di alam liar, teknik pembiakan buatan seperti inseminasi buatan dan IVF menjadi sangat kritis untuk upaya pemulihan populasi badak Sumatera.
- Kuda Przewalski: Spesies ini dianggap punah di alam liar pada tahun 1960-an tetapi berhasil dipulihkan melalui program pembiakan di penangkaran dan reintroduksi ke habitat alami. Inseminasi buatan dan transfer embrio telah digunakan sebagai bagian dari strategi konservasinya.

Pentingnya Teknologi Pembibitan dan Pemulihan Populasi. Penggunaan teknologi pembiakan buatan dalam konservasi menyediakan alat yang berharga untuk memperkuat populasi spesies yang terancam punah, memperkaya keragaman genetik, dan mengurangi inbreeding. Selain itu, kemajuan dalam teknologi reproduksi asistensi memberikan harapan baru untuk pemulihan spesies yang jumlahnya sangat terbatas. Namun, keberhasilan jangka panjang dari upaya konservasi ini juga sangat bergantung pada perlindungan habitat, pengelolaan sumber daya, dan mitigasi ancaman lain terhadap spesies tersebut.

14.2.2 Program Reintroduksi Spesies dalam Pelestarian Biota Laut

Program reintroduksi spesies merupakan salah satu strategi penting dalam pelestarian biota laut, yang bertujuan untuk mengembalikan spesies yang terancam punah atau sudah hilang dari habitat aslinya (Geist & Hawkins, 2016). Program ini melibatkan pengembalian individu yang dibesarkan dalam penangkaran atau yang dipindahkan dari lokasi lain ke habitat asli mereka atau habitat baru yang

sesuai, dengan tujuan untuk membangun kembali populasi yang stabil dari spesies tersebut. Program reintroduksi dapat memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan keberlanjutan spesies dan pemulihan keragaman ekosistem.

Langkah-langkah kunci dari program reintroduksi adalah:

1. Seleksi Spesies Sasaran: Memilih spesies yang terancam punah dengan potensi pemulihan tinggi melalui reintroduksi.
2. Evaluasi Habitat: Mengidentifikasi dan mengevaluasi habitat yang cocok untuk kelangsungan hidup individu yang akan direintroduksi.
3. Manajemen Populasi: Memelihara dan mengelola individu yang dibesarkan dalam penangkaran atau yang dipindahkan, untuk memastikan kesehatan mereka.
4. Reintroduksi dan Pemantauan: Mengembalikan individu ke habitat baru dan terus memantau adaptasi, kelangsungan hidup, dan reproduksi mereka.

Contoh program reintroduksi:

- Reintroduksi Terumbu Karang di Karibia: Menanggapi penurunan dan kerusakan terumbu karang di wilayah Karibia, program reintroduksi dan pembibitan terumbu karang sedang dilakukan. Para peneliti bekerja untuk meningkatkan kapasitas reproduksi terumbu karang dan mendukung pertumbuhan serta reproduksi terumbu karang yang direintroduksi di lingkungan alami.
- Program Reintroduksi Penyu Laut: Di beberapa wilayah, program perlindungan dan pemulihan populasi penyu melibatkan inkubasi buatan dan reintroduksi. Tujuannya adalah untuk melepaskan tukik ke laut guna meningkatkan tingkat kelangsungan hidup mereka.
- Program Reintroduksi Singa Laut: Di beberapa wilayah, program reintroduksi sedang dilaksanakan untuk memulihkan populasi singa laut yang berkurang akibat kehilangan habitat atau aktivitas manusia.

Pentingnya program reintroduksi: Program reintroduksi memainkan peran krusial dalam pelestarian spesies biota laut yang terancam punah dan pemulihan ekosistem (Swan *et al.*, 2016). Program-program ini berkontribusi terhadap pemeliharaan keanekaragaman hayati dan pemulihan kesehatan serta fungsi ekosistem. Namun, keberhasilan program reintroduksi bergantung pada perencanaan yang

matang, pemantauan yang berkelanjutan, dan dukungan serta kerja sama dari komunitas lokal.

14.2.3 Proteksi Habitat dengan Teknologi

14.2.3.1 Pembuatan Terumbu Karang Buatan

Pembuatan terumbu karang buatan merupakan salah satu upaya proteksi dan pemulihan habitat laut yang memanfaatkan teknologi (Matus *et al.*, 2024). Terumbu karang buatan ini dibangun untuk menyediakan habitat bagi kehidupan laut, membantu regenerasi terumbu karang alami, dan meningkatkan keragaman biologis di bawah laut. Terumbu buatan dapat dibuat dari berbagai material, mulai dari beton hingga struktur yang lebih ramah lingkungan dan biodegradable.

Proses Pembuatan Terumbu Karang Buatan:

1. **Desain dan Material:** Pemilihan desain dan material yang akan digunakan harus mempertimbangkan kondisi lingkungan laut setempat dan jenis spesies yang diharapkan dapat berlandung dan berkembang biak di terumbu buatan tersebut. Material yang sering digunakan antara lain adalah beton, keramik, dan bahan biodegradable seperti struktur berbasis kapur atau mineral lain yang dapat mendukung pertumbuhan organisme karang.
2. **Penempatan:** Terumbu buatan harus ditempatkan di lokasi yang strategis, dimana kondisi aliran air, kedalaman, dan substrat dasar mendukung pertumbuhan karang dan spesies lainnya. Penempatan yang tepat juga meminimalisir dampak negatif terhadap ekosistem asli.
3. **Pemantauan dan Manajemen:** Setelah terumbu karang buatan ditempatkan, proses pemantauan secara berkala dilakukan untuk menilai kesuksesan integrasi terumbu buatan dengan lingkungan sekitarnya dan pertumbuhan biota laut yang diharapkan.

Contoh Pembuatan Terumbu Karang Buatan:

- *The Biorock Process:* Teknologi ini menggunakan arus listrik lemah dalam air laut untuk mempercepat pertumbuhan mineral kalsium karbonat pada struktur baja. Struktur ini kemudian menjadi dasar bagi pertumbuhan karang dan habitat bagi spesies laut lainnya. Proyek ini telah diterapkan di berbagai lokasi di dunia, termasuk Indonesia.

- *Reef Balls*: Ini adalah struktur beton berpori yang dirancang untuk meniru karakteristik terumbu karang alami. *Reef Balls* tidak hanya menyediakan struktur untuk karang untuk menempel dan tumbuh tetapi juga habitat bagi berbagai spesies kehidupan laut. Ribuan *Reef Balls* telah ditempatkan di seluruh dunia untuk membangun atau memperkuat terumbu karang.

Pembuatan terumbu karang buatan merupakan salah satu cara inovatif yang memanfaatkan teknologi dalam upaya pelestarian dan proteksi habitat laut. Dengan pendekatan ini, diharapkan kerusakan pada terumbu karang alami dapat diminimalisir dan keanekaragaman hayati laut dapat terjaga (Levy *et al.*, 2022).

14.2.3.2 Penggunaan *Barrier* Teknologis untuk Melindungi Area Konservasi

Penggunaan *barrier* teknologis merupakan salah satu metode efektif dalam melindungi area konservasi, terutama untuk mencegah masuknya spesies invasif, polusi, dan aktivitas manusia yang dapat merusak habitat. *Barrier* teknologis ini dapat berupa perangkat fisik atau sistem berbasis teknologi yang dirancang untuk memonitor dan mengontrol akses ke area konservasi (Martinez *et al.*, 2020).

Jenis-Jenis *Barrier* Teknologis:

1. *Barrier* Fisik: Termasuk pagar, dinding, atau struktur lainnya yang membatasi akses fisik ke area konservasi. *Barrier* ini dapat dibuat dari berbagai material, termasuk yang ramah lingkungan, dan seringkali dirancang sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu keindahan alam atau habitat asli.
2. Sistem Pengawasan Berbasis Teknologi: Meliputi penggunaan kamera pengawas, *drone*, dan satelit untuk memonitor aktivitas dalam area konservasi. Teknologi ini memungkinkan pengawasan secara *real-time* dan dapat membantu dalam identifikasi cepat terhadap kegiatan ilegal atau masuknya spesies invasif.
3. Sistem Informasi Geografis (GIS): GIS digunakan untuk memetakan dan mengelola data terkait area konservasi. Dengan GIS, pengelola dapat merencanakan strategi pengelolaan yang lebih efektif, termasuk penentuan lokasi *barrier* teknologis yang paling strategis.

4. *Barrier* Akustik: Terutama digunakan di bawah air untuk melindungi habitat laut. *Barrier* ini mengeluarkan gelombang suara yang dapat menghalau spesies invasif atau aktivitas perikanan yang tidak diinginkan tanpa merusak kehidupan laut yang ada.

Contoh Penerapan *Barrier* Teknologis:

- Pagar Listrik di Afrika: Untuk melindungi area konservasi dari masuknya pemburu dan hewan predator, beberapa taman nasional di Afrika mengimplementasikan pagar listrik. Pagar ini dirancang untuk memberi peringatan atau hambatan tanpa menyebabkan cedera serius.
- Penggunaan *Drone* di Taman Nasional: Di banyak negara, *drone* digunakan untuk memonitor wilayah konservasi yang luas. *Drone* membantu dalam deteksi dini kebakaran hutan, aktivitas pembalakan liar, dan pergerakan spesies invasif.
- *Barrier* Akustik untuk Melindungi Lumba-Lumba di Australia: Di beberapa daerah di Australia, *barrier* akustik digunakan untuk menghalau hiu dari area perairan di mana lumba-lumba sering berada, untuk mengurangi risiko serangan hiu terhadap populasi lumba-lumba.

Penggunaan *barrier* teknologis dalam melindungi area konservasi menawarkan solusi yang efektif dan seringkali lebih berkelanjutan dibanding metode konvensional (Pimm *et al.*, 2015). Teknologi ini memungkinkan pengelolaan yang lebih baik dan lebih terkontrol terhadap area yang dilindungi, dengan dampak minimal terhadap lingkungan alami dan spesies yang berada di dalamnya.

14.2.4 Penggunaan *Drone* dalam Konservasi

14.2.4.1 Pemantauan Populasi dan Habitat dengan *Drone*

Penggunaan *drone* dalam konservasi alam telah menjadi sebuah terobosan dalam beberapa tahun terakhir. *Drone*, atau pesawat tanpa awak, menawarkan kemampuan untuk mengumpulkan data dari udara dengan cara yang lebih efisien dan kurang mengganggu dibandingkan metode konvensional. Hal ini sangat berguna dalam pemantauan populasi dan habitat, terutama di lokasi yang sulit dijangkau atau berbahaya bagi manusia.

Proses Pemantauan dengan *Drone*:

1. Perencanaan Penerbangan: Menentukan area pemantauan dan merencanakan rute penerbangan *drone*. Hal ini biasanya melibatkan penggunaan peta digital dan perangkat lunak khusus untuk merencanakan jalur yang paling efektif.
2. Pengumpulan Data: *Drone* dilengkapi dengan berbagai sensor dan kamera, memungkinkan pengambilan gambar dan video resolusi tinggi, termasuk data multispektral dan termal, yang dapat digunakan untuk menganalisis kondisi habitat dan keberadaan spesies tertentu.
3. Analisis Data: Data yang dikumpulkan oleh *drone* kemudian dianalisis untuk mendapatkan informasi tentang populasi dan kondisi habitat. Teknik-teknik pemrosesan citra dan algoritma khusus dapat digunakan untuk mengidentifikasi, menghitung, dan memetakan spesies serta karakteristik habitat mereka.

Contoh Penggunaan *Drone* dalam Konservasi:

- Pemetaan Terumbu Karang: Di wilayah tropis, *drone* digunakan untuk memetakan dan memonitor kondisi terumbu karang. Dengan menggunakan kamera multispektral, peneliti dapat menilai kesehatan terumbu karang dan menemukan area yang memerlukan restorasi atau perlindungan lebih lanjut.

Penggunaan *drone* dalam konservasi menawarkan cara yang lebih cepat, efisien, dan aman untuk memantau dan melindungi spesies serta habitat mereka. Dengan teknologi ini, upaya konservasi dapat dilakukan dengan lebih akurat dan efektif, membantu dalam pelestarian keanekaragaman hayati untuk generasi yang akan datang.

14.2.4.2 *Drone* Bawah Air untuk Studi Ekosistem Laut

Drone bawah air, atau yang sering disebut dengan *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs), telah menjadi alat penting dalam penelitian konservasi laut (Fish, 2020). *Drone* ini memungkinkan para peneliti untuk menjelajahi dan mempelajari ekosistem bawah laut dengan cara yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan karena keterbatasan akses dan biaya operasional yang tinggi.

Fungsi dan Keuntungan *Drone* Bawah Air:

1. Eksplorasi Lingkungan yang Beragam: *Drone* bawah air dapat beroperasi di berbagai lingkungan, mulai dari kedalaman laut hingga di bawah es. Hal ini memungkinkan studi ekosistem laut di wilayah yang sebelumnya sulit dijangkau atau sama sekali tidak terjangkau.
2. Pengumpulan Data Resolusi Tinggi: *Drone* bawah air dilengkapi dengan kamera resolusi tinggi, sonar, dan berbagai sensor lainnya, yang memungkinkan pembuatan peta dasar laut secara detil dan studi ekologi serta distribusi kehidupan laut.
3. Pemantauan Jangka Panjang: *Drone* bawah air dapat beroperasi di dasar laut untuk periode waktu yang lama, memungkinkan pemantauan perubahan lingkungan laut dalam jangka panjang.

Aplikasi *Drone* Bawah Air:

- Penelitian Terumbu Karang: Di kawasan terumbu karang besar seperti Great Barrier Reef di Australia, *drone* bawah air digunakan untuk memantau kesehatan terumbu karang, biodiversitas, dan perubahan struktural pada terumbu. Data ini memberikan informasi penting untuk upaya konservasi dan restorasi terumbu karang.
- Eksplorasi Laut Dalam: Laut dalam merupakan salah satu lingkungan paling tidak diketahui di Bumi. *Drone* bawah air digunakan untuk mempelajari karakteristik geologis, kehidupan laut dalam, dan aktivitas gunung berapi bawah laut.
- Pemantauan Sampah Laut: *Drone* bawah air digunakan untuk melacak distribusi dan pergerakan sampah laut, khususnya mikroplastik dan polutan lainnya. Informasi ini membantu dalam pengembangan strategi untuk mencegah polusi laut.

Drone bawah air merupakan alat penting untuk memahami kerumitan dan keanekaragaman ekosistem laut. Teknologi ini memungkinkan para peneliti untuk menilai ekologi kehidupan laut, perubahan lingkungan laut, dan dampak aktivitas manusia terhadap lautan dengan lebih akurat. Kemajuan teknologi *drone* bawah air membuka kemungkinan baru dalam ilmu kelautan dan memperdalam pemahaman kita tentang konservasi laut.

14.3 Teknologi Pengelolaan Sumber Daya Laut

14.3.1 Sistem Manajemen Perikanan Berkelanjutan

14.3.1.1 Teknologi Pelacakan Kapal dan Identifikasi Tangkapan Ilegal

Dalam upaya meningkatkan keberlanjutan perikanan, teknologi pelacakan kapal dan identifikasi tangkapan ilegal memainkan peranan penting (Fujita *et al.*, 2018). Teknologi ini tidak hanya membantu dalam mengawasi aktivitas perikanan tetapi juga dalam mengidentifikasi dan mencegah penangkapan ikan secara ilegal, yang dikenal sebagai IUU (*Illegal, Unreported, and Unregulated*) fishing.

Teknologi Pelacakan Kapal:

1. Sistem Identifikasi Otomatis (AIS): AIS adalah sistem pelacakan kapal yang berfungsi melalui transponder yang dipasang pada kapal. Sistem ini mengirimkan informasi seperti identitas kapal, posisi, kecepatan, dan arah tujuan secara real-time. AIS membantu otoritas perikanan dalam memantau pergerakan kapal secara efektif.
2. *Vessel Monitoring System* (VMS): VMS adalah sistem pelacakan yang lebih khusus digunakan untuk pengawasan perikanan. Sistem ini memungkinkan otoritas perikanan untuk memantau posisi, kurs, dan kecepatan kapal perikanan. Informasi ini sangat berguna untuk menegakkan zona perikanan dan waktu penangkapan yang telah ditetapkan.

Identifikasi Tangkapan Ilegal:

1. Penggunaan *Drone* dan Satelit: Penggunaan *drone* dan satelit dalam mengidentifikasi aktivitas penangkapan ikan ilegal menjadi semakin populer. Teknologi ini memungkinkan pengawasan dari udara atau angkasa, memberikan gambaran yang jelas tentang aktivitas ilegal yang mungkin terjadi di laut.
2. Sistem Pelaporan dan Verifikasi Elektronik (e-Logbooks): E-Logbooks memungkinkan kapal perikanan untuk melaporkan tangkapan mereka secara digital. Hal ini memudahkan otoritas perikanan untuk memverifikasi tangkapan kapal dan mengidentifikasi jika ada kejanggalan atau indikasi penangkapan ikan secara ilegal.

Contoh Implementasi:

Salah satu contoh penerapan teknologi ini adalah program *Global Fishing Watch* yang menggunakan data AIS untuk melacak pergerakan

kapal perikanan secara global. Program ini memanfaatkan teknologi big data dan AI untuk menganalisis pola pergerakan kapal, yang dapat mengindikasikan aktivitas penangkapan ikan ilegal. Melalui analisis ini, otoritas perikanan bisa mengambil tindakan preventif atau penegakan hukum untuk menghadapi kapal-kapal yang terlibat dalam IUU fishing.

Teknologi pelacakan kapal dan identifikasi tangkapan ilegal merupakan komponen kunci dalam sistem manajemen perikanan berkelanjutan. Dengan menggunakan teknologi ini, otoritas perikanan dapat lebih efektif dalam mengawasi dan mengelola sumber daya perikanan, memastikan bahwa kegiatan perikanan berlangsung secara legal, terlapor, dan teratur (Chuaysi & Kiattisin, 2020).

14.3.1.2 Sistem Kuota dan Pelaporan Tangkapan Berbasis Digital

Dalam rangka meningkatkan keberlanjutan perikanan, penerapan sistem kuota dan pelaporan tangkapan berbasis digital menjadi salah satu strategi kunci (Geppert *et al.*, 2024). Sistem ini bertujuan untuk mengontrol jumlah tangkapan yang diizinkan sehingga tidak melebihi batas yang telah ditentukan guna menjaga keberlanjutan stok ikan. Selain itu, pelaporan berbasis digital memudahkan pengawasan dan analisis data tangkapan secara real-time.

Sistem kuota perikanan adalah regulasi yang menetapkan jumlah maksimum tangkapan untuk spesies ikan tertentu dalam periode waktu tertentu (Copes, 2019). Kuota ini ditetapkan berdasarkan penelitian ilmiah yang mendalam mengenai populasi ikan dan kapasitas regenerasi ekosistem laut. Tujuannya adalah untuk mencegah penangkapan berlebihan yang dapat mengancam keberadaan spesies dan keseimbangan ekosistem.

Pelaporan Tangkapan Berbasis Digital:

1. E-Logbooks (Buku Log Elektronik): Kapal perikanan dilengkapi dengan sistem e-logbook di mana nelayan dapat melaporkan jumlah dan jenis tangkapan secara digital. Data ini kemudian dikirimkan secara real-time ke otoritas perikanan untuk dianalisis dan dipantau.
2. Sistem Pelaporan dan Monitoring Online: Penggunaan aplikasi atau platform online yang memungkinkan nelayan untuk melaporkan tangkapan mereka langsung dari laut. Sistem ini juga memungkinkan

otoritas perikanan untuk memonitor aktivitas perikanan secara real-time dan mengambil tindakan cepat apabila terdapat pelanggaran.

Contoh Implementasi:

Salah satu contoh implementasi sistem kuota dan pelaporan tangkapan berbasis digital adalah program perikanan berkelanjutan yang diterapkan oleh Uni Eropa. Program ini menggunakan sistem kuota yang ketat bersamaan dengan sistem pelaporan digital untuk memastikan bahwa semua negara anggota mematuhi batasan tangkapan yang telah ditetapkan. Setiap kapal perikanan harus memiliki perangkat yang terhubung dengan sistem pelaporan elektronik Uni Eropa, memungkinkan pemantauan tangkapan secara real-time dan efektif.

Dengan adanya sistem kuota dan pelaporan tangkapan berbasis digital, pemanfaatan sumber daya perikanan dapat dilakukan secara lebih bertanggung jawab. Sistem ini membantu memastikan bahwa praktik perikanan tidak merusak lingkungan laut dan menjaga kelangsungan hidup industri perikanan untuk generasi mendatang.

14.3.2 Inovasi dalam Budidaya Laut

14.3.2.1 Sistem Budidaya Laut Berkelanjutan dengan Aquaponik dan Hydroponik

Dalam upaya mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya laut dan meningkatkan keberlanjutan, kombinasi antara aquaponik dan hidroponik menjadi terobosan inovatif dalam budidaya laut (Verma *et al.*, 2023). Metode ini mengintegrasikan pemeliharaan ikan (*aquaculture*) dengan budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah (hidroponik), menciptakan sistem yang sinergis dimana limbah dari satu proses menjadi nutrisi bagi proses lainnya.

Aquaponik:

Aquaponik adalah sistem yang menggabungkan *aquaculture* (budidaya ikan) dengan hidroponik (budidaya tanaman dengan larutan nutrisi tanpa tanah) dalam satu lingkungan terintegrasi. Dalam sistem ini, air yang mengandung limbah ikan, kaya akan amonia, dipompa ke unit hidroponik. Bakteri nitrifikasi kemudian mengonversi amonia menjadi nitrit dan nitrat, yang merupakan nutrisi penting bagi pertumbuhan tanaman. Setelah diserap oleh tanaman, air tersebut menjadi lebih bersih dan dipompa kembali ke sistem *aquaculture*.

Hidroponik:

Hidroponik adalah metode budidaya tanaman menggunakan solusi nutrisi di dalam air tanpa tanah. Tanaman tumbuh di dalam media seperti kerikil, arang, atau serat kelapa, yang mendukung akar dan memungkinkan akses mudah ke solusi nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan. Hidroponik memungkinkan budidaya tanaman di lokasi dengan lahan terbatas atau tanah yang tidak subur.

Implementasi:

Sebagai contoh, di Indonesia, terdapat beberapa inisiatif dan proyek yang mengimplementasikan sistem budidaya laut berkelanjutan dengan aquaponik dan hidroponik. Salah satunya adalah proyek yang dilakukan di Pulau Pramuka, Kepulauan Seribu, dimana sistem aquaponik diintegrasikan dengan budidaya ikan kerapu dan tanaman sayuran seperti selada dan bayam. Sistem ini tidak hanya meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan tetapi juga memberikan solusi bagi keterbatasan lahan dan air tawar di pulau tersebut.

Keuntungan dari sistem budidaya laut berkelanjutan dengan aquaponik dan hidroponik antara lain efisiensi penggunaan air, pengurangan limbah, produksi makanan yang lebih berkelanjutan, dan potensi peningkatan pendapatan bagi petani dan masyarakat pesisir. Melalui inovasi ini, dapat tercipta sistem produksi makanan yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, mendukung upaya konservasi laut dan pengembangan ekonomi biru.

14.3.2.2 Penerapan Teknologi RAS (*Recirculating Aquaculture System*) dalam Marikultur

Teknologi RAS (*Recirculating Aquaculture System*) merupakan salah satu inovasi terkemuka dalam bidang budidaya laut atau marikultur (Ahmed & Turchini, 2021). Sistem ini dirancang untuk menyediakan lingkungan optimal bagi pertumbuhan ikan dengan mengontrol kondisi air, termasuk suhu, pH, kadar oksigen, dan limbah, secara berkelanjutan. Penerapan teknologi RAS dalam marikultur memungkinkan budidaya ikan di lokasi yang tidak memungkinkan untuk budidaya tradisional, termasuk daerah pedalaman atau daerah dengan keterbatasan akses ke air bersih.

Prinsip Kerja RAS:

Sistem RAS beroperasi dengan prinsip sirkulasi ulang air. Air dari kolam ikan dipompa melalui serangkaian unit pengolahan untuk menghilangkan limbah dan menambahkan oksigen sebelum dikembalikan ke kolam. Ini menciptakan lingkungan hidup yang bersih dan sehat untuk ikan tanpa perlu mengganti air secara terus-menerus, sehingga mengurangi konsumsi air dan dampak lingkungan.

Komponen Utama RAS:

1. Unit Filtrasi: Menghilangkan partikel padat dan limbah organik dari air.
2. Unit Biofilter: Mengubah amonia berbahaya yang dihasilkan oleh ikan menjadi nitrat yang kurang berbahaya melalui proses nitrifikasi.
3. Unit Oksigenasi: Menambahkan oksigen ke air untuk memastikan kadar oksigen yang cukup untuk ikan.
4. Unit Pengontrol Suhu: Mengatur suhu air sesuai dengan kebutuhan spesifik spesies ikan yang dibudidayakan.

Contoh Penerapan:

Salah satu contoh penerapan teknologi RAS dalam marikultur di Indonesia adalah budidaya lobster air tawar di Yogyakarta. Dalam proyek ini, lobster air tawar dibudidayakan dalam sistem RAS yang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan biologis dan lingkungan lobster. Sistem ini memungkinkan pengontrolan kondisi air secara ketat, termasuk suhu, pH, dan kadar oksigen, yang sangat penting untuk pertumbuhan dan kesehatan lobster. Dengan menggunakan teknologi RAS, petani lobster dapat meningkatkan produksi, mengurangi risiko penyakit, dan meminimalkan penggunaan air serta dampak lingkungan dari kegiatan budidayanya.

Penerapan teknologi RAS dalam marikultur menawarkan berbagai keuntungan, termasuk efisiensi penggunaan air, kontrol lingkungan yang lebih baik, pengurangan risiko penyakit, dan produksi yang lebih berkelanjutan (Aich dkk., 2020). Teknologi ini membuka peluang baru bagi pengembangan marikultur di lokasi-lokasi yang sebelumnya tidak memungkinkan untuk budidaya ikan, memberikan kontribusi penting bagi keberlanjutan industri perikanan dan keamanan pangan global.

14.3.3 Pemanfaatan Energi Terbarukan di Laut

14.3.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang dan Pasang Surut

Energi laut, khususnya energi gelombang dan pasang surut, merupakan sumber energi terbarukan yang potensial dan berkelanjutan (Khojasteh *et al.*, 2018). Pemanfaatan energi ini melalui pembangkit listrik tenaga gelombang dan pasang surut menjadi salah satu solusi inovatif dalam memenuhi kebutuhan energi yang ramah lingkungan.

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang:

Pembangkit listrik tenaga gelombang memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh pergerakan gelombang laut untuk menghasilkan listrik (Farrok *et al.*, 2020). Prinsip kerjanya beragam, salah satunya melalui penggunaan boya atau pelampung yang naik turun bersama gelombang. Gerakan naik turun ini kemudian diubah menjadi energi mekanik yang menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Contoh penerapannya adalah proyek Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang di Pantai Mutriku di Spanyol. Pembangkit ini menggunakan teknologi *Oscillating Water Column* (OWC) yang mengubah energi gelombang menjadi udara bertekanan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut:

Pembangkit listrik tenaga pasang surut memanfaatkan perbedaan tinggi permukaan air laut antara pasang dan surut untuk menghasilkan energi (Neto *et al.*, 2015). Pembangkit ini biasanya menggunakan bendungan (barrage) yang memblokir bagian teluk atau muara untuk menampung air saat pasang. Ketika air surut, air yang tertampung dilepaskan melalui turbin yang menghasilkan listrik.

Salah satu contoh pembangkit listrik tenaga pasang surut adalah Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Sihwa Lake di Korea Selatan, yang merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga pasang surut terbesar di dunia. Pembangkit ini memanfaatkan bendungan untuk menghasilkan listrik dengan kapasitas hingga 254 MW.

Keuntungan dan Tantangan:

Keuntungan utama dari pembangkit listrik tenaga gelombang dan pasang surut adalah sumber energinya yang berkelanjutan dan minim emisi karbon. Hal ini menawarkan alternatif energi terbarukan yang

dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca.

Namun, pengembangan dan penerapan teknologi ini juga menghadapi beberapa tantangan, termasuk biaya investasi awal yang tinggi, dampak lingkungan terhadap ekosistem laut, serta tantangan teknis terkait efisiensi dan pemeliharaan peralatan di lingkungan laut yang keras.

Meskipun masih terdapat tantangan, potensi energi gelombang dan pasang surut sebagai sumber energi terbarukan menjanjikan kontribusi signifikan bagi masa depan energi bersih. Dengan penelitian dan pengembangan yang terus-menerus, teknologi ini diharapkan menjadi lebih efisien dan terjangkau, memperluas pemanfaatan energi laut sebagai bagian dari mix energi global.

14.3.3.2 Implementasi Panel Surya Terapung

Panel surya terapung merupakan inovasi dalam teknologi energi terbarukan yang memanfaatkan permukaan air sebagai lokasi pemasangan panel surya (Gamarra & Ronk, 2019). Konsep ini menjadi solusi cerdas bagi keterbatasan lahan yang sering menjadi kendala dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga surya. Dengan memanfaatkan area permukaan air seperti danau, waduk, atau area perairan lainnya, panel surya terapung tidak hanya menghasilkan energi bersih tapi juga mengurangi penguapan air dan memperbaiki kualitas air dengan mengurangi pertumbuhan alga.

Prinsip Kerja:

Panel surya terapung bekerja dengan prinsip yang sama dengan panel surya konvensional. Panel terapung yang terpasang di atas permukaan air menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik melalui sel fotovoltaik. Sistem ini kemudian menghubungkan listrik yang dihasilkan ke jaringan listrik di darat atau digunakan untuk kebutuhan lokal di sekitar area perairan.

Komponen Penting:

1. Panel Surya: Merupakan komponen utama yang menangkap dan mengubah energi matahari menjadi listrik.
2. Struktur Terapung: Didesain untuk menjaga panel surya agar tetap mengapung di atas air dan stabil terhadap gerakan air.

3. Sistem Mooring: Sistem penambat yang memastikan panel surya terapung tetap berada pada posisinya meskipun terdapat pergerakan air.
4. Inverter: Mengubah arus listrik DC (Direct Current) yang dihasilkan panel surya menjadi AC (Alternating Current) yang dapat digunakan oleh jaringan listrik.

Contoh Implementasi:

Salah satu contoh implementasi panel surya terapung yang sukses adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung di Waduk Banasura Sagar di India. Proyek ini merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga surya terapung terbesar di India, dengan kapasitas 500 kW. Pembangkit ini tidak hanya menghasilkan energi bersih tapi juga membantu dalam konservasi air dengan mengurangi penguapan.

Keuntungan:

- Efisiensi Tinggi: Air membantu mendinginkan panel, yang meningkatkan efisiensi pengoperasian dibandingkan dengan panel surya yang dipasang di darat.
- Mengurangi Penguapan: Penutupan permukaan air oleh panel surya dapat mengurangi laju penguapan dari waduk atau danau.
- Tidak Memerlukan Lahan Baru: Memanfaatkan area perairan yang ada, mengurangi kebutuhan akan penggunaan lahan baru.

Tantangan:

- Biaya Awal: Biaya pemasangan dan pemeliharaan sistem panel surya terapung bisa lebih tinggi dibandingkan dengan sistem terestrial.
- Dampak Lingkungan: Perlu dilakukan studi mengenai dampak jangka panjang terhadap ekosistem air.

Implementasi panel surya terapung menawarkan solusi energi terbarukan yang inovatif dan efisien, khususnya di wilayah dengan keterbatasan lahan. Dengan penelitian dan pengembangan lebih lanjut, teknologi ini dapat menjadi bagian penting dari portofolio energi bersih global.

14.4 Teknologi Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran Laut

14.4.1 Teknologi Pengumpulan Sampah Laut

14.4.1.1 Pengembangan Alat Pengumpul Sampah Otomatis di Permukaan Laut

Pencemaran sampah di lautan telah menjadi masalah lingkungan global yang serius, mempengaruhi ekosistem laut dan kesehatan manusia (Landrigan *et al.*, 2020). Untuk mengatasi masalah ini, berbagai inovasi teknologi telah dikembangkan, salah satunya adalah alat pengumpul sampah otomatis di permukaan laut. Alat ini dirancang untuk mengumpulkan sampah secara efisien tanpa perlu intervensi manusia yang intensif.

Prinsip Kerja:

Alat pengumpul sampah otomatis di permukaan laut biasanya menggunakan kombinasi dari beberapa teknologi, termasuk sensor untuk mendeteksi sampah, sistem penggerak untuk bergerak di permukaan air, dan mekanisme pengumpulan untuk mengambil sampah. Beberapa alat juga dilengkapi dengan sistem pemilahan untuk membedakan antara jenis sampah yang dapat didaur ulang dan yang tidak.

Komponen Utama:

1. **Sensor dan AI:** Untuk mendeteksi posisi sampah di permukaan laut. AI membantu dalam pengidentifikasian jenis sampah dan memutuskan strategi pengambilan yang paling efektif.
2. **Sistem Penggerak:** Memungkinkan alat bergerak di permukaan laut, biasanya menggunakan tenaga surya atau baterai yang dapat diisi ulang.
3. **Mekanisme Pengumpulan:** Berupa jaring atau conveyor belt untuk mengumpulkan sampah dari permukaan laut.
4. **Sistem Pemilahan:** Memisahkan sampah berdasarkan jenisnya, memudahkan proses daur ulang.

Contoh Implementasi:

Salah satu contoh implementasi alat pengumpul sampah otomatis adalah "*The Ocean Cleanup*" yang merupakan sebuah proyek ambisius untuk membersihkan *Great Pacific Garbage Patch* (Van Stijn, 2023). Proyek ini menggunakan sistem penghalang panjang yang mengapung, dirancang untuk dipasang di permukaan laut dan memanfaatkan arus laut alami untuk mengumpulkan sampah. Sistem ini dilengkapi dengan

sistem pengawasan dan pengumpulan yang otomatis, memungkinkan pengumpulan sampah secara efisien dengan minim intervensi manusia.

Keuntungan:

- **Efisiensi Tinggi:** Dapat beroperasi 24/7 tanpa perlu istirahat, meningkatkan volume sampah yang dapat dikumpulkan.
- **Ramah Lingkungan:** Biasanya menggunakan tenaga surya, mengurangi emisi karbon.
- **Minim Kontak Manusia:** Mengurangi risiko bagi manusia dalam pengumpulan sampah di area berbahaya.

Tantangan:

- **Biaya:** Pengembangan dan operasional yang relatif mahal.
- **Durabilitas:** Harus tahan terhadap kondisi laut yang keras.
- **Pemeliharaan:** Memerlukan pemeliharaan rutin untuk menjaga kinerja optimal.

Pengembangan alat pengumpul sampah otomatis di permukaan laut menawarkan harapan baru dalam upaya membersihkan lautan dari sampah. Meskipun masih ada tantangan yang perlu diatasi, kemajuan teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam memperbaiki kesehatan ekosistem laut dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan.

14.4.1.2 Strategi dan Implementasi Sistem Skimmer Minyak

Polusi minyak di laut merupakan salah satu masalah lingkungan yang serius, yang tidak hanya merusak ekosistem laut tetapi juga mengancam kehidupan marin dan ekonomi pesisir (Yu *et al.*, 2021). Untuk mengatasi masalah ini, salah satu teknologi yang dikembangkan adalah sistem skimmer minyak. Sistem ini dirancang untuk mengumpulkan minyak yang tumpah di permukaan laut secara efisien.

Prinsip Kerja:

Sistem skimmer minyak bekerja dengan mengambil minyak yang mengapung di permukaan air. Skimmer dirancang untuk memisahkan minyak dari air, mengumpulkan minyak, dan menyimpannya di dalam tangki penyimpanan untuk diproses lebih lanjut. Teknologi ini memanfaatkan perbedaan sifat fisik antara minyak dan air, seperti gravitasi spesifik dan ketegangan permukaan.

Komponen Utama:

1. **Unit Skimming:** Bagian yang berfungsi untuk mengumpulkan minyak dari permukaan air. Terdapat beberapa jenis skimmer, seperti weir skimmer, disk skimmer, dan brush skimmer, yang masing-masing memiliki prinsip kerja yang berbeda.
2. **Pompa:** Menghisap minyak yang telah dikumpulkan oleh unit skimming ke dalam tangki penyimpanan.
3. **Tangki Penyimpanan:** Tempat penyimpanan sementara untuk minyak yang telah diambil dari laut.
4. **Sistem Kontrol dan Monitoring:** Memantau operasi skimmer dan mengoptimalkan efisiensi pengumpulan minyak.

Implementasi

Salah satu contoh implementasi sistem skimmer minyak adalah pada kasus tumpahan minyak *Deepwater Horizon* di Teluk Meksiko pada tahun 2010. Dalam insiden ini, berbagai jenis skimmer minyak digunakan untuk mengumpulkan minyak yang tumpah ke laut. Skimmer-sikat, skimmer-disk, dan weir skimmer digunakan secara bersamaan untuk mengatasi tumpahan minyak dalam skala besar.

Strategi:

- **Penempatan Strategis:** Skimmer ditempatkan di lokasi di mana konsentrasi minyak di permukaan air paling tinggi untuk meningkatkan efisiensi pengumpulan.
- **Kombinasi Teknologi:** Menggunakan berbagai jenis skimmer secara bersamaan untuk menangani berbagai kondisi tumpahan minyak.
- **Pemantauan dan Kontrol:** Menggunakan teknologi pemantauan untuk memantau proses pengumpulan minyak dan mengadaptasi strategi secara real-time.

Keuntungan:

- **Efisien dalam Mengumpulkan Minyak:** Dapat mengumpulkan minyak dengan cepat dan mengurangi dampak lingkungan.
- **Fleksibel:** Berbagai jenis skimmer dapat digunakan sesuai dengan jenis dan skala tumpahan minyak.
- **Pengurangan Dampak Lingkungan:** Meminimalkan kerusakan pada ekosistem laut dan pantai.

Tantangan:

- **Kondisi Laut:** Gelombang dan cuaca buruk dapat menghambat operasi skimmer.
- **Pemisahan Minyak dan Air:** Efisiensi pemisahan minyak dari air dapat berkurang tergantung pada kondisi tumpahan.
- **Biaya:** Biaya operasional dan pemeliharaan sistem skimmer minyak bisa menjadi signifikan.

Pengembangan dan implementasi sistem skimmer minyak merupakan langkah penting dalam manajemen tumpahan minyak, membantu melindungi ekosistem laut dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan.

14.4.2 Teknologi Bioremediasi

14.4.2.1 Penggunaan Bakteri dan Mikroorganisme dalam Membersihkan Tumpahan Minyak

Bioremediasi merupakan sebuah teknik yang menggunakan mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan fitoplankton, untuk mengurai polutan menjadi zat-zat yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Pal *et al.*, 2020). Dalam konteks tumpahan minyak, teknologi ini memanfaatkan kemampuan mikroorganisme untuk mengonsumsi dan mengubah hidrokarbon yang terkandung dalam minyak menjadi senyawa yang tidak beracun, seperti karbon dioksida dan air.

Mekanisme Kerja:

- **Seleksi Mikroorganisme:** Mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi hidrokarbon dipilih. Beberapa mikroorganisme memiliki spesialisasi dalam mendegradasi jenis hidrokarbon tertentu.
- **Optimasi Kondisi Lingkungan:** Kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan ketersediaan oksigen diatur untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme.
- **Aplikasi Mikroorganisme:** Mikroorganisme yang telah dipilih dan dikultur diterapkan pada area yang terkontaminasi tumpahan minyak.

Contoh:

- *Pseudomonas putida*: Bakteri ini merupakan salah satu mikroorganisme yang sering digunakan dalam bioremediasi

tumpahan minyak. *Pseudomonas putida* mampu mengurai berbagai jenis hidrokarbon, termasuk benzena, toluen, dan xilena.

- ***Alcanivorax borkumensis***: Spesies ini dikenal sebagai 'pembersih minyak alami' karena kemampuannya yang sangat efisien dalam mendegradasi hidrokarbon rantai panjang yang ditemukan dalam minyak. *Alcanivorax borkumensis* berkembang biak dengan cepat di lingkungan yang kaya akan hidrokarbon dan dapat secara signifikan mengurangi jumlah minyak di perairan terkontaminasi.

Aplikasi:

- **Pembersihan Tumpahan Minyak Deepwater Horizon**: Pada tahun 2010, bioremediasi mikroorganisme digunakan sebagai salah satu metode untuk membersihkan tumpahan minyak di Teluk Meksiko. Mikroorganisme yang dapat mendegradasi hidrokarbon diperkenalkan ke dalam perairan untuk membantu mempercepat proses pemulihan ekosistem.
- **Sanitasi Pantai**: Di beberapa daerah yang mengalami tumpahan minyak pantai, teknik bioremediasi telah digunakan untuk mengembalikan kondisi pasir dan ekosistem pantai. Mikroorganisme diintroduksi langsung ke area yang terkontaminasi atau melalui biostimulasi, yaitu dengan menambahkan nutrisi untuk memicu pertumbuhan mikroorganisme pengurai minyak.

Keuntungan:

- **Ramah Lingkungan**: Proses bioremediasi tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya.
- **Efektif untuk Pemulihan Jangka Panjang**: Dapat mengembalikan ekosistem terkontaminasi ke kondisi semula.
- **Biaya yang Relatif Rendah**: Dibandingkan dengan metode fisik dan kimia lainnya, bioremediasi cenderung lebih murah.

Tantangan:

- **Laju Degradasi**: Laju degradasi hidrokarbon oleh mikroorganisme dapat dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan, sehingga prosesnya bisa lambat.
- **Selektivitas**: Tidak semua jenis hidrokarbon dapat diurai oleh satu jenis mikroorganisme.
- **Kontrol**: Pengawasan dan kontrol yang ketat diperlukan untuk memastikan efektivitas proses bioremediasi.

Melalui pemanfaatan bakteri dan mikroorganisme dalam teknologi bioremediasi, tumpahan minyak dapat ditangani dengan cara yang lebih berkelanjutan dan minim dampak negatif terhadap lingkungan (Ivshina *et al.*, 2015).

14.4.2.2 Fitoremediasi: Pemanfaatan Tumbuhan dalam Menyerap Polutan

Fitoremediasi adalah teknik remediasi lingkungan yang memanfaatkan kemampuan tumbuhan untuk menyerap, mengakumulasi, dan/atau mendegradasi polutan dari tanah, air, atau udara (Chandra dkk., 2015). Proses ini merupakan alternatif yang ramah lingkungan untuk mengurangi polusi, khususnya untuk kontaminan seperti logam berat, pestisida, pelarut organik, dan hidrokarbon.

Mekanisme Fitoremediasi:

1. **Fitoekestaksi:** Tumbuhan menyerap polutan, terutama logam berat, melalui akar dan mengakumulasikannya di dalam jaringan tumbuhan.
2. **Fitodegradasi:** Tumbuhan mendegradasi polutan organik menjadi bentuk yang kurang berbahaya melalui proses metabolisme internal.
3. **Fitostabilisasi:** Tumbuhan mengurangi mobilitas polutan di lingkungan, menjaga agar polutan tetap berada di dalam tanah dan menghindari pencemaran lebih lanjut.
4. **Fitovolatilisasi:** Tumbuhan menyerap polutan dan melepaskannya ke atmosfer dalam bentuk yang kurang berbahaya.

Contoh Penerapan Fitoremediasi:

- **Pembersihan Cadmium menggunakan *Sunflower (Helianthus annuus)*:** *Sunflower* dikenal dapat menyerap cadmium, salah satu logam berat yang berbahaya, dari tanah. Tumbuhan ini digunakan di area yang terkontaminasi cadmium untuk mengurangi kadar polutan di tanah.
- **Penggunaan *Indian Mustard (Brassica juncea)* untuk Mengurangi Timbal:** *Indian Mustard* memiliki kemampuan untuk menyerap timbal dari tanah, menjadikannya salah satu tumbuhan yang efektif untuk fitoremediasi logam berat.
- **Penggunaan *Poplar Trees* untuk Fitoremediasi Hidrokarbon:** *Poplar Trees*, atau pohon poplar, memiliki sistem akar yang luas dan

mampu mendegradasi hidrokarbon yang terkontaminasi di tanah dan air tanah, menjadikannya efektif untuk pembersihan situs yang terkontaminasi oleh bahan kimia organik.

Keuntungan Fitoremediasi:

- **Ramah Lingkungan:** Teknik ini menggunakan cara alami dan minim dampak negatif terhadap lingkungan.
- **Biaya Efektif:** Umumnya lebih murah dibandingkan metode remediasi konvensional.
- **Estetika dan Fungsional:** Selain membersihkan lingkungan, tumbuhan juga meningkatkan estetika dan dapat dimanfaatkan untuk tujuan lain seperti penghijauan.

Tantangan Fitoremediasi:

- **Waktu:** Proses fitoremediasi bisa memakan waktu yang lebih lama dibandingkan metode remediasi lain.
- **Selektivitas:** Tidak semua tumbuhan efektif untuk semua jenis polutan.
- **Manajemen:** Memerlukan pengetahuan dan manajemen yang baik untuk memastikan efektivitas proses fitoremediasi.

Fitoremediasi menawarkan solusi inovatif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah polusi (Jeevanantham *et al.*, 2019). Dengan pemilihan tumbuhan yang tepat dan manajemen yang baik, teknik ini dapat menjadi bagian penting dalam upaya remediasi lingkungan.

14.4.3 Pengolahan Limbah dengan Teknologi Canggih

14.4.3.1 Sistem Pengolahan Limbah Cair Berbasis Teknologi Nano

Sistem pengolahan limbah cair dengan menggunakan teknologi nano merupakan salah satu pendekatan inovatif yang memanfaatkan partikel nano untuk mengatasi polutan dalam air limbah (Khan *et al.*, 2021). Teknologi ini memanfaatkan sifat unik dari material nano, seperti luas permukaan yang besar dan reaktivitas kimia yang tinggi, untuk meningkatkan efektivitas pengolahan limbah.

Mekanisme Kerja:

1. **Adsorpsi:** Material nano seperti nanopartikel karbon atau nanozeolit memiliki luas permukaan yang besar, memungkinkan mereka untuk menyerap polutan dari limbah cair secara efisien.

2. Fotokatalisis: Nanopartikel seperti TiO_2 dapat bertindak sebagai fotokatalis yang, ketika terpapar cahaya, dapat memecah polutan organik menjadi CO_2 dan air.
3. Membran Nanofiltrasi: Membran yang diperkuat dengan nanopartikel dapat memisahkan polutan berdasarkan ukuran, memungkinkan penghapusan partikel sangat kecil dan molekul polutan.
4. Nanobioremediasi: Penggunaan nanopartikel untuk meningkatkan proses bioremediasi dengan mempercepat degradasi polutan oleh mikroorganisme.

Contoh Penerapan:

- Penggunaan Nanopartikel Perak untuk Disinfeksi: Nanopartikel perak dapat membunuh bakteri dan mikroorganisme lain dalam air limbah, menjadikannya efektif untuk proses disinfeksi.
- Nanopartikel Besi untuk Pengolahan Limbah Industri: Nanopartikel besi digunakan untuk mengurangi kontaminan tertentu seperti klorida dan logam berat dalam limbah industri.
- Membran Nanofiltrasi untuk Pengolahan Air: Membran yang diperkuat dengan nanopartikel dapat secara efektif menghilangkan garam, mikroorganisme, dan polutan organik dari air limbah, menjadikannya cocok untuk proses desalinasi dan pengolahan air minum.

Keuntungan:

- Efisiensi Tinggi: Material nano dapat menargetkan dan menghapus polutan dengan lebih efisien dibandingkan metode tradisional.
- Konsumsi Energi Rendah: Banyak proses berbasis nano memerlukan konsumsi energi yang lebih rendah.
- Fleksibilitas: Teknologi nano dapat disesuaikan untuk berbagai jenis limbah cair dan polutan.

Tantangan:

- Biaya: Produksi dan implementasi nanopartikel masih relatif mahal.
- Keamanan dan Lingkungan: Masih ada kekhawatiran tentang dampak nanopartikel terhadap kesehatan manusia dan lingkungan.

- Pemulihan dan Daur Ulang: Memulihkan dan mendaur ulang nanopartikel dari sistem pengolahan limbah memerlukan teknologi tambahan.

Pengolahan limbah cair menggunakan teknologi nano menawarkan solusi yang sangat efektif dan berpotensi revolusioner untuk mengatasi tantangan pengolahan air limbah (Naskar *et al.*, 2022). Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi hambatan biaya, keamanan, dan kekhawatiran lingkungan agar teknologi ini dapat diadopsi secara luas

14.4.3.2 Inovasi dalam Pengolahan dan Penggunaan Kembali Limbah Plastik

Pengolahan dan penggunaan kembali limbah plastik merupakan salah satu tantangan lingkungan yang besar di era modern (Evode dkk., 2021). Berbagai inovasi telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini, yang tidak hanya fokus pada daur ulang konvensional, tetapi juga mencari cara untuk mengubah limbah plastik menjadi produk bernilai tambah atau sumber energi.

1. Teknologi Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi termal limbah plastik dalam kondisi suhu tinggi dan tanpa oksigen. Proses ini mengubah plastik menjadi bahan bakar minyak, gas, dan arang. Sebagai contoh, perusahaan di Inggris telah mengembangkan teknologi pirolisis yang dapat mengubah limbah plastik menjadi minyak diesel yang dapat digunakan sebagai bahan bakar.

2. Enzim Pengurai Plastik

Penelitian terbaru telah menemukan enzim yang mampu mendegradasi plastik jenis tertentu dengan lebih cepat dibandingkan proses alami. Sebagai contoh, enzim PETase telah ditunjukkan untuk mempercepat degradasi PET, jenis plastik yang umum digunakan dalam botol minuman. Penggunaan enzim ini dapat mempercepat proses daur ulang plastik.

3. Plastik Terurai Biologis

Inovasi lain adalah pengembangan plastik yang dapat terurai secara biologis. Berbeda dari plastik konvensional, plastik ini dibuat dari bahan-bahan alami seperti pati jagung, yang memungkinkan mereka

terurai menjadi komponen yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Beberapa perusahaan telah memulai penggunaan plastik biodegradable untuk kemasan produk atau tas belanja.

4. Konversi Limbah Plastik menjadi Paving Block

Di beberapa negara, limbah plastik telah digunakan sebagai salah satu komponen untuk membuat paving block atau bahan bangunan lainnya. Limbah plastik dikumpulkan, dibersihkan, dan dicampur dengan bahan lain seperti pasir sebelum dicetak menjadi paving block. Inovasi ini tidak hanya mengurangi limbah plastik tetapi juga menyediakan alternatif yang lebih murah dan tahan lama untuk bahan bangunan.

5. Daur Ulang Kimia

Berbeda dengan daur ulang mekanis yang hanya mengubah bentuk fisik plastik, daur ulang kimia menguraikan plastik kembali ke monomer-monomer penyusunnya. Hal ini memungkinkan pembuatan plastik baru dengan kualitas yang sama dengan plastik virgin. Salah satu contoh adalah proses depolimerisasi, yang dapat mengubah polistirena menjadi styrene monomer, bahan dasar untuk membuat polistirena baru.

Inovasi-inovasi ini menunjukkan komitmen dan kreativitas dalam mengatasi masalah limbah plastik. Melalui pengembangan dan penerapan teknologi baru, kita dapat mengurangi dampak negatif plastik terhadap lingkungan dan menuju ke arah pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelbasset, W.K., S.A. Jasim, S.K. Sharma, R. Margiana, D.O. Bokov, M.A. Obaid, B.A. Hussein, H.A. Lafta, S.F. Jasim, Y.F. Mustafa. (2022). Alginate-based hydrogels and tubes, as biological macromolecule-based platforms for peripheral nerve tissue engineering: a review, *Ann. Biomed. Eng.* 50 (6), 628-653, <https://doi.org/10.1007/s10439-022-02955-8>.
- Adams, S. (2023) Different Types Of Coral: 17 Beautiful Species <https://www.citrusreef.com/blogs/news/types-of-coral-reef-species>
- Adisty, N. (2022). Papua Miliki Ekosistem Mangrove Terluas di Indonesia. <https://goodstats.id/article/pulau-dengan-ekosistem-mangrove-terluas-di-indonesia-ur0dP>.
- Aditi, M., L. Varsha. (2020). Fish processing: product and by-product, processing and marketing, *Int. j. fish. aquat. stud.* 8 (1), 74-77.
- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters. *Remote Sensing*, 15(7), 1938.
- Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., & Abdulai, J. D. (2017). Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 13(1), 1-41.
- Agardy, T., & Claudet, J. (2018). Ocean governance at a critical juncture. *Marine Policy*, 87, 331-339.
- Ahmad, M. M., Kumar, A., Ranjan, R., & Azad, M. (2022). Recent developments of tidal energy as renewable energy: An overview. In book: *River and Coastal Engineering*. pp.329-343.
- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner production*, 297, 126604.
- Ahnert, A., & Borowski, C. (2000). Environmental risk assessment of anthropogenic activity in the deep sea. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress & Recovery*, 7(4), 299.

- ahteenmaki-Uutela, A. L., M. Rahikainen, M.T. Camarena-Gomez, J. Piiparinen, K. Spilling, B. Yang (2021). European Union legislation on macroalgae products, *Aquac. Int.* 29 (2), 487–509, <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00633-x>.
- ahteenmaki-Uutela, L., M. Rahikainen, M.T. Camarena-Gomez, J. Piiparinen, K. Spilling, B. Yang. (2021). European Union legislation on macroalgae products, *Aquac. Int.* 29 (2), 487–509, <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00633-x>.
- Aich, N., Nama, S., Biswal, A., & Paul, T. (2020). A review on recirculating aquaculture systems: Challenges and opportunities for sustainable aquaculture. *Innovative Farming*, 5(1), 017-024.
- Alisha, R. Prakash, H. Aisha. (2019). Seaweed: nutritional and health benefits, *Pharma Innov. J.* 8 (8), 80–83.
- Al-Jaberi, M. H., Al-Dabbas, M. A., & Jaber, M. Q. (2018). Mineralogy and geochemistry of coral reef in Iraqi Marine Environment in the north part of Arabian Gulf. *Bulletin of the Iraq Natural History Museum*, 15(2), 189-20.
- Ameen, I., Hidan, M., Mostefaoui, Z. & Ali, H.M. (2020) Fractional Optimal Control with Fish Consumption to Prevent the Risk of Coronary Heart Disease, *Complexity*, 13.
- Anderson, E. M., Garcia, M. J., & Smith, K. L. (2021). Role of Phytoplankton and Zooplankton in Marine Food Chains. *Journal of Marine Biology*, 25(3), 112-125.
- Arief, A. (2007). *Hutan Mangrove Fungsi dan Manfaatnya*. Buku. Kanisius. Yogyakarta. 48 hlm.
- Aris, M., Butudoka, M. A., & Pristianto, H. (2018). Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Potensi Penutupan Muara Oleh Sedimentasi.
- Arreguin-Sanchez, F. (2024). Ecosystem Resilience and Sustainability in a Dynamically Changing Environment. *Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition)*, 105–113. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00068-8>
- Bae, M., M.B. Kim, Y.K. Park, J.Y. Lee. (2020). Health benefits of fucoxanthin in the prevention of chronic diseases, *Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Biol. Lipids* 1865 (11), 158618, <https://doi.org/10.1016/j.bbailip.2020.158618>
- Baez, S. (2021) 7 Reasons to Protect Seagrass <https://www.pewtrusts.org/en/research-and->

- analysis/articles/2021/03/16/7-reasons-to-protect-seagrass#:~:text=Seagrass%20leaves%20slow%20the%20flow,clarity%20and%20reduces%20coastal%20erosion.
- Baheramsyah. (2024, 10 Januari). *Menteri KP akan kebut Program Ekonomi Biru di 2024*. Diakses pada 30 April 2024, dari <https://infopublik.id/kategori/nasional-ekonomi-bisnis/815436/menteri-kp-akan-kebut-program-ekonomi-biru-di-2024>
- Baker, J. M., Clark, R. B., Kingston, P. F., & Jenkins, R. H. (1990). *Natural recovery of cold water marine environments after an oil spill*. Institute of Offshore Engineering Heriot-Watt University.
- Benway, H. M., Lorenzoni, L., White, A. E., Fiedler, B., Levine, N. M., Nicholson, D. P., ... & Letelier, R. M. (2019). Ocean time series observations of changing marine ecosystems: an era of integration, synthesis, and societal applications. *Frontiers in Marine Science*, 6, 393.
- Bibi, S.N.; Fawzi, M.M.; Gokhan, Z.; Rajesh, J.; Nadeem, N.; Kannan, R.R.R.; Albuquerque, R.D.D.G.; Pandian, S.K. (2019). Ethnopharmacology, phytochemistry, and global distribution of mangroves-a comprehensive review. *Mar. Drugs*, 17, 231.
- Bogue, R. (2015). Underwater robots: a review of technologies and applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 42(3), 186-191.
- Borges, S., J. Odila, G. Voss, R. Martins, A. Rosa, J.A. Couto, A. Almeida, M. Pintado. (2023). Fish by-products: a Source of enzymes to generate circular bioactive hydrolysates, *Molecules* 28 (3), 1155, <https://doi.org/10.3390/molecules28031155>.
- Boschen, R. E., Rowden, A. A., Clark, M. R., & Gardner, J. P. (2016). Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks, and management strategies. *Ocean & Coastal Management*, 128, 23-38.
- Boston, N. (1996). Draft Guildes for the local implementation of shoreline protection for spesies marine area.
- Boyd, C.E. (2015). Overview of aquaculture feeds: global impacts of ingredient use, in: D.A. Davis (Ed.), *Feed and Feeding Practices in Aquaculture*, Woodhead Publishing Series in Food Science,

- Technology and Nutrition, pp. 3–25, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00001-5>
- Brown, A. L., & Anderson, E. M. (2018). Significance of Marine Sediments in Ecosystem Dynamics. *Journal of Marine Sedimentology*, 25(3), 112-125.
- Brown, A. L., & Johnson, M. W. (2018). Role of Public Awareness in Marine Conservation. *Conservation Biology Journal*, 25(3), 112-125.
- Brown, A. L., & Smith, K. L. (2019). Impact of Ocean Acidification on Marine Organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 45(1), 112-125.
- Brown, A. L., et al. (2019). Sensor Technologies for Oceanographic Research: Current Trends and Future Perspectives. *Sensors Journal*, 35(1), 112-125.
- Brown, A. L., et al. (2020). Role of Marine Bacteria in Nutrient Cycling. *Journal of Oceanographic Research*, 35(2), 213-230.
- Brown, A. L., Garcia, M. J., & Smith, K. L. (2018). Management Strategies for Sustainable Fisheries Based on Marine Chemistry. *Journal of Fisheries Management*, 35(2), 213-230
- Brown, A., & Thompson, J. (2018). Impacts of Global Climate Change on Ocean Physics. *Climate Change Journal*, 25(3), 112-125.
- Budiyanto, F.; Alhomaidi, E.A.; Mohammed, A.E.; Ghandourah, M.A.; Alorfi, H.S.; Bawakid, N.O.; Alarif, W.M. (2022). Exploring the Mangrove Fruit: From the Phytochemicals to Functional Food Development and the Current Progress in the Middle East. *Mar. Drugs*, 20, 303. <https://doi.org/10.3390/md20050303>
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F. F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4(2), 111-116.
- Chan, J. K. L., Marzuki, K. M., & Mohtar, T. M. (2021). Local Community Participation And Responsible Tourism Practices In Ecotourism Destination: A Case Of Lower Kinabatangan, Sabah. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/Su132313302>
- Chandra, R., Saxena, G., & Kumar, V. (2015). Phytoremediation of environmental pollutants: an eco-sustainable green technology to

- environmental management. *Advances in biodegradation and bioremediation of industrial waste*, 1-29.
- Chandravanshi, N.K., S. Chowdhury, S. Nath. (2019). Characterization of fish glue from croaker wastes, *Environ. Ecol.* 37 (2), 611–615.
- Chaudhary, C., Alfaro-Lucas, J. M., Simões, M. V. P., Brandt, A., & Saeedi, H. (2023). Potential geographic shifts in the coral reef ecosystem under climate change. *Progress in Oceanography*, 213, 103001. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2023.103001>
- Cheevaporn, V., & Menasveta, P. (2003). Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 47, 43-51.
- Chen, L., et al. (2020). Significance of Turbulence in Ocean Mixing. *Journal of Oceanographic Research*, 35(2), 213-230.
- Cherry, P., C. O'Hara, P.J. Magee, E.M. McSorley, P.J. Allsopp. (2019). Risks and benefits of consuming edible seaweeds, *Nutr. Rev.* 77 (5), 307–329, <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy066>
- Chuaysi, B., & Kiattisin, S. (2020). Fishing vessels behavior identification for combating IUU fishing: Enable traceability at sea. *Wireless Personal Communications*, 115, 2971-2993.
- Cita, Wigioseptina. (2020). UI, L. F. Regional and Energy Resources Brief.
- Collette, B. B., et al. (2011). Tunas and billfishes of the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Conyers, D. (1991). *Perencanaansosial Di Dunia ketiga*. Yogyakarta: UGM Press
- Copes, P. (2019). A critical review of the individual quota as a device in fisheries management. *Fisheries Economics, Volume I*, 311-324.
- Corne, K.V. (2022). Pencemaran Lingkungan: Pengertian, Jenis, Dampak dan Cara Pencegahannya. <https://www.inews.id/news/nasional/pencemaran-lingkungan-pengertian-jenis-dampak-dan-cara-pencegahannya/all>. Diakses 28 Mei 2024.
- Cranon, D. S. (2019). Manganese nodules. *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Third Edition), 5, 607-614.
- Cronin, L. E., édit. (1975). *Estuarine Research*; vol. II, Geology and Engineering, New York, Acad. Press, xiv + 587 p.

- Cruz, J. M., Pérez, A. C., & Pérez, J. M. (2014). Wave energy potential in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-285.
- Danamik, B. (2018). Pertanggungjawaban dan Upaya Pemulihan Pencemaran Laut di Wilayah Laut Timor yang Bersumber dari Meledaknya Kilang Minyak di Montara. *Departemen Hukum Internasional*, 372(2).
- Danial, T. (2012). Evaluasi Kebijakan Pengelolaan Kawasan Pantai Utara Kabupaten Bekasi Dalam Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat Pesisir. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, Vol. 1 Edisi Desember 2012.
- Danovaro, R., Carugati, L., Berzano, M., Cahill, A. E., Carvalho, S., Chenuil, A., ... & Borja, A. (2016). Implementing and innovating marine monitoring approaches for assessing marine environmental status. *Frontiers in Marine Science*, 3, 213.
- Davis, P., & Brockhurst, J. (2015). Subsea pipeline infrastructure monitoring: A framework for technology review and selection. *Ocean Engineering*, 104, 540-548.
- Davis, W. P., Hoss, D. E., Scott, G. I., & Sheridan, P. F. (1984). Fisheries resource impacts from spills of oil or hazardous substances. *Restoration of Habitats Impacted by Oil Spills*, Butterworth Boston. 1984. Edited by John Cairns, Jr. and Arthur L. Buikema, Jr., p 157-172, 1 Tab, 37 Ref.
- Dedy, M. (2023). PEMODELAN GEOSPASIAL DAYA DUKUNG LINGKUNGAN UNTUK LAHAN PERTANIAN PANGAN BERKELANJUTAN (LP2B) KABUPATEN PRINGSEWU.
- Delevaux, J. M. S., Guerry, A. D., Griffin, R., & Ruckelshaus, M. H. (2024). Modeling Marine Ecosystem Services. *Encyclopedia of Biodiversity, Third Edition: Volume 1-7*, 236-253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00246-2>
- Devy, S., & Rahmi, S. (2019). Peran Panglima Laot Dalam Penyelesaian Tindak Pidana Illegal Fishing Di Perairan Pulo Aceh. *Legitimasi: Jurnal Hukum Pidana Dan Politik Hukum*, 8(1), 103. <https://doi.org/10.22373/Legitimasi.V8i1.6442>
- Dzakirizq, A. Z., & Nugroho, S. N. W. (2023). Rancangan Penilaian Proyek Konstruksi Berdasarkan Kriteria Sustainability Development

- Menggunakan Metode FAHP Dan TOPSIS Di PT SAM. *Industrial Engineering Online Journal*, 12(2).
- Echave, J., P. Otero, P. Garcia-Oliveira, P.E.S. Munekata, M. Pateiro, J.M. Lorenzo, J. Simal-Gandara, M.A. Prieto. (2022). Seaweed-derived proteins and peptides: promising marine bioactives, *Antioxidants* 11 (1), 176, <https://doi.org/10.3390/antiox11010176>.
- Eiting, T. P., & Smith, G. R. (2007). Miocene salmon (*Oncorhynchus*) from Western North America: Gill Raker evolution correlated with plankton productivity in the Eastern Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249(3–4), 412–424. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2007.02.011>
- Elvevoll EO, Eilertsen KE, Brox J, Dragnes BT, Falkenberg P, Olsen JO et al. (2008). Seafood diets: hypolipidemic and antiatherogenic effects of taurine and n-3 fatty acids. *Atherosclerosis* 200(2):396–402
- Etemadi, A., Emdadi, A., AsefAfshar, O., & Emami, Y. (2011). Electricity generation by the ocean thermal energy. *Energy Procedia*, 12, 936–943.
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142.
- Falkowski, P. G., et al. (2008). The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 305(5682), 354–360.
- Falkowski, P., & Raven, J. A. (2007). *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press.
- FAO. (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformacion ´ azul [2022 World State for Fisheries and Aquaculture. To Blue Transformation], 978-92-5-136369-0, Organizacion ´ de las Naciones Unidas para la Alimentacion ´ y Agricultura, Roma.
- Farrok, O., Ahmed, K., Tahlil, A. D., Farah, M. M., Kiran, M. R., & Islam, M. R. (2020). Electrical power generation from the oceanic wave for sustainable advancement in renewable energy technologies. *Sustainability*, 12(6), 2178.

- Fathurrahman, F., & Al Faruq, M. S. (2021). Sinergisme Komunitas Dalam Penyelenggaraan Pendidikan Di Tengah Pandemi. *Ilmu Pendidikan: Jurnal Kajian Teori Dan Praktik Kependidikan*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.17977/Um027v6i22021p053>
- Fish, F. E. (2020). Advantages of aquatic animals as models for bio-inspired drones over present AUV technology. *Bioinspiration & biomimetics*, 15(2), 025001.
- Flick, G.J., R.E. Martin (2000). Industrial products: gelatin and isinglass production, in: R.E. Martin, E.P. Carter, G.J. Flick, L.M. Davis Jr (Eds.), *Marine and Freshwater Products Handbook*, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania, pp. 605–612.
- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia, M., & Pokrovski, G. S. (2017). Sulfide minerals in hydrothermal deposits. *Elements*, 13(2), 97-103.
- Fortes, M. D. (1990). Seagrasses: A Resource Unknown in the ASEAN Region. Association of Southeast Asian Nations/United States Coastal Resources Management Project Education Series 6.
- Fu, W., Ma, J., Chen, P., & Chen, F. (2020). Remote sensing satellites for digital earth. *Manual of digital earth*, 55-123.
- Fujita, R., Cusack, C., Karasik, R., Takade-Heumacher, H., & Baker, C. (2018). Technologies for improving fisheries monitoring. *Environmental Defense Fund, San Francisco*, 71.
- Fujiwara, T. and Y. Komai. (2009). Nutrient dynamics in coastal seas. *Aquabiology*, 31:134 -140
- Galieriková, A., & Materna, M. (2020). World seaborne trade with oil: One of main cause for oil spills? *Transportation Research Procedia*, 44, 297–304.
- Gamarra, C., & Ronk, J. (2019). Floating solar: an emerging opportunity at the energy-water nexus. *Texas Water Journal*, 10(1), 32-45.
- Gambín, Á. F., Angelats, E., González, J. S., Miozzo, M., & Dini, P. (2021). Sustainable marine ecosystems: deep learning for water quality assessment and forecasting. *IEEE access*, 9, 121344-121365.
- Garcia, M. J., & Anderson, E. M. (2020). Role of Plankton in Marine Food Webs. *Marine Ecology Progress Series*, 45(1), 112-125.
- Garcia, M. J., & Brown, A. L. (2020). Collaborative Approaches to Sustainable Fisheries Management. *Fisheries Research Journal*, 45(1), 112-125.

- Garcia, M. J., & Brown, A. L. (2020). Impact of Industrial Pollution on Marine Chemistry. *Marine Pollution Bulletin*, 40(2), 213-230
- Garcia, M. J., & Johnson, M. W. (2020). Role of Submarine Volcanism in Ocean Floor Formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 45(1), 112-125.
- Garcia, M. J., et al. (2020). Importance of Monitoring and Research in Marine Conservation. *Marine Policy Journal*, 35(2), 213-230.
- Garcia, M. J., et al. (2021). Sustainable Adaptation Strategies for Coastal Communities. *Journal of Coastal Research*, 35(2), 213-230
- Garcia, M. J., et al. (2021). Understanding the Dynamics of Fish Populations: Insights from Biological Oceanography. *Fisheries Science Journal*, 35(2), 213-230.
- Garcia, M. J., Smith, K. L., & Johnson, M. W. (2021). Innovative Solutions for Global Challenges in Oceanography. *Journal of Oceanographic Research*, 45(1), 213-230.
- Garcia, M., & Smith, K. (2020). Importance of Thermal Circulation in Marine Ecosystems. *Marine Ecology Journal*, 45(1), 112-125.
- García-Vaquero, M., et al. (2017). Seaweeds for human health. In *Seaweed in Health and Disease Prevention* (pp. 53-76). Academic Press.
- Ge, B., H. Wang, J. Li, H. Liu, Y. Yin, N. Zhang, S. Qin. (2020). Comprehensive assessment of Nile tilapia skin (*Oreochromis niloticus*) collagen hydrogels for wound dressings, *Mar. Drugs* 18 (4), 178, <https://doi.org/10.3390/md18040178>
- Geist, J., & Hawkins, S. J. (2016). Habitat recovery and restoration in aquatic ecosystems: current progress and future challenges. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(5), 942-962.
- Geppert, F., Krachunova, T., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2024). *Digital and smart technologies in agriculture in Germany: Identification of key recommendations for sustainability actions* (No. 4-2024). Studien zum deutschen Innovationssystem.
- Gerlach, S.A. (1981) *Marine Pollution: Diagnosis and Therapy*. Springer-Verlag, Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-68182-0>
- GESAMP. (1976). Report and studies No.2: Review of harmful substances. United Nations, New York, 80p.

- Ghattavi, S.; Homaei, A. (2023). Marine enzymes: Classification and application in various industries. *Int. J. Biol. Macromol.* 230, 123136.
- Gladstone-Gallagher, R. V., Hewitt, J. E., Low, J. M. L., Pilditch, C. A., Stephenson, F., Thrush, S. F., & Ellis, J. I. (2024). Coupling marine ecosystem state with environmental management and conservation: A risk-based approach. *Biological Conservation*, 292, 110516. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2024.110516>
- Glynn, P. W. (1996). Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. *Global Change Biology*, 2(6), 495-509.
- Hacney, C.T dan A.A. de la Cruz. (1986). Belowground Productivity of reeots and rhizomes in a giant cordgrass marsh, *Estuaries*.
- Hajar, S., Rauf, B. A., Ah, A. B., Wahab, H. B., Binti, S. H., & Rauf, A. (2019). Konsep Jaringan dan Aplikasi Teori Jaringan Sosial ke dalam Jaringan Perkhidmatan Kebajikan Kanak-kanak. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH)*, 4(3), 147. Retrieved from www.msocialsciences.com
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952.
- Haryanto, T. P. (2013). Pengaruh pengeluaran pemerintah terhadap pertumbuhan ekonomi kabupaten/kota di Provinsi Jawa Tengah tahun 2007-2011. *Economics Development Analysis Journal*, 2(3).
- He, W.; Nabangchang, O.; Erdman, K.; Vanko, A.C.A.; Poudel, P.; Giri, C.; Vincent, J.R. (2023). Inferring economic impacts from a program's physical outcomes: An application to forest protection in Thailand. *Environ. Resour. Econ.* 2022, in pressJ. DeAngelo, B.T. Saenz, I.B. Arzeno-Soltero, C.A. Frieder, M.C. Long, J. Hamman, K.A. Davis, S.J. Davis, Economic and biophysical limits to seaweed farming for

- climate change mitigation, *Nat. Plants* 9 (1), 45–57, <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01305-9>
- Hedley, J. D., Roelfsema, C., Brando, V., Giardino, C., Kutser, T., Phinn, S., ... & Koetz, B. (2018). Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote sensing of environment*, 216, 598–614.
- Hellio, C., A.M. Pons, C. Beaupoil, N. Bourgougnon, Y.L. Gal. (2002). Antibacterial, antifungal and cytotoxic activities of extracts from fish epidermis and epidermal mucus, *Int. J. Antimicrob. Agents* 20 (3), 214–219, [https://doi.org/10.1016/s0924-8579\(02\)00172-3](https://doi.org/10.1016/s0924-8579(02)00172-3).
- Hermansyah, H., & Febriani, F. (2020). Dampak kerusakan lingkungan ekosistem terumbu karang. *Jurnal Kependudukan dan Pembangunan Lingkungan*, 1(3), 42–51.
- Herrick, J. R. (2019). Assisted reproductive technologies for endangered species conservation: developing sophisticated protocols with limited access to animals with unique reproductive mechanisms. *Biology of Reproduction*, 100(5), 1158–1170.
- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328(5985), 1523–1528.
- Hong Nham, N. T., Mai Hoa, T. T., & Ha, L. T. (2023). Influences of digitalization on sustaining marine minerals: A path toward sustainable blue economy. *Ocean & Coastal Management*, 239, 106589. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2023.106589>
- https://ankuri.hiho.jp/yama/norm_hm/southocean.htm Diakses pada 20 Mei 2024
- <https://bappeda.jogjapro.go.id/artikel/detail/52-strategi-penyelenggaraan-infrastruktur-bidang-pu-untuk-meningkatkan-kualitas-lingkungan>
- <https://bonaventura21.wordpress.com/2014/01/25/pencemaran-laut-akibat-tumpahan-minyak/>
- <https://geographicbook.com/bottom-topography-of-pacific-ocean/> Diakses pada 20 Mei 2024
- <https://geographicbook.com/bottom-topography-the-atlantic-ocean/> Diakses pada 20 Mei 2024
- <https://geology.com/articles/arctic-ocean-features/> Diakses pada 20 Mei 2024

https://inaturalist.ca/taxa/196661-Sonneratia-alba/browse_photos
<https://jikalahari.or.id/kabar/klipingberita/21-hutan-mangrove-dunia-ada-di-indonesia-ini-3-provinsi-terbesar/>
<https://kemangteerjakarta.wordpress.com/jenis-mangrove/bruguiera-gymnorrhiza/>
<https://lautsehat.id/flora-fauna/mala/mikroplastik-di-ekosistem-lamun/>
<https://national-oceanographic.com/article/potensi-hutan-mangrove-sebagai-penguat-kawasan-ekowisata-1>
<https://rezamuhammadazhar.wordpress.com/2010/04/15/resume-ekologi-laut-tropis/>
<https://science4fun.info/pacific-ocean/> Diakses pada 20 Mei 2024
<https://tidechaser.blogspot.com/2011/11/tengar-ceriops-tagal.html>
<https://validnews.id/nasional/Memagari-Terumbu-Karang-Dari-Keserakahan-Manusia-yri>
https://www.blue-growth.org/Oceans_Rivers_Seas/Index_Oceans_Seas_Bays_Gulfs_Of_The_World_%20A_To_Z_Lists.htm Diakses pada 20 Mei 2024
<https://www.britannica.com/place/Southern-Ocean> Diakses pada 20 Mei 2024
<https://www.dictio.id/t/apa-saja-tipe-tipe-atau-macam-macam-terumbu-karang/83787>
<https://www.forclime.org/documents/Books/Con%20Area%20Mang%20Indo%201August.pdf>
<https://www.goodnewsfromindonesia.id/2022/01/19/pentingnya-peran-padang-lamun-sebagai-penunjang-kehidupan-biota-laut>
<https://www.idntimes.com/science/experiment/ina-suraga/mengenal-eutrofikasi-c1c2>
<https://www.manajemensekolah.web.id/2020/05/lembar-kerja-peserta-didik-persebarang.html>
<https://www.mapsales.com/national-geographic/world-wall-maps/indian-ocean-floor-wall-map.aspx> Diakses pada 20 Mei 2024
<https://www.marinebio.org/oceans/geography/> Diakses pada 20 Mei 2024

- <https://www.mongabay.co.id/2019/06/23/foto-ini-ragam-produksi-mangrove-si-api-api/>
- <https://www.shutterstock.com/id/image-photo/rhizophora-mucronata-species-mangrove-found-on-1122509033>
- <https://www.whatarethe7continents.com/indian-ocean/> Diakses pada 20 Mei 2024
- https://www.worldrover.com/vital/arctic_ocean.html Diakses pada 20 Mei 2024
- https://www.worldrover.com/vital/atlantic_ocean.html Diakses pada 20 Mei 2024
- Huang, X., Zhang, B., Perrie, W., Lu, Y., & Wang, C. (2022). A novel deep learning method for marine oil spill detection from satellite synthetic aperture radar imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 179, 113666.
- Hughes, T. P., et al. (2018). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377.
- Hwang, J., Bose, N., Nguyen, H. D., & Williams, G. (2020). Acoustic search and detection of oil plumes using an autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 1-11.
- Iqbal, M. (2022) Jenis Mangrove yang Perlu Kamu Ketahi, Ternyata Menyimpan Banyak Manfaat Loh
<https://lindungihutan.com/blog/jenis-jenis-mangrove-dan-penjasannya/>
- Ivshina, I. B., Kuyukina, M. S., Krivoruchko, A. V., Elkin, A. A., Makarov, S. O., Cunningham, C. J., ... & Philp, J. C. (2015). Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(7), 1201-1219.
- Jayakody, M.M., M.P.G. Vanniarachchy, I. Wijesekara. (2022). Seaweed derived alginate, agar, and carrageenan based edible coatings and films for the food industry: a review, *J. Food. Measure. Charact.* 16 (2), 1195-1227, <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01277-y>.
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: a survey on

- application and future prospects. *Environmental technology & innovation*, 13, 264-276.
- Jefferson, T. A., et al. (2015). Marine mammals of the world: A comprehensive guide to their identification. Academic Press.
- Jiang, Y., Jiang, J., Geng, C., Fei, Y., Chen, Y., Zhuang, Q., Xing, Z., & Ju, Z. (2024). Rational regulation of defect-rich hierarchical porous carbon nanosheets as sustainable anode materials for potassium-ion storage. *Journal of Energy Storage*, 75, 109544. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109544>
- Johnson, M. W., & Brown, A. L. (2019). Impact of Climate Change on Ocean Currents. *Oceanography Journal*, 45(1), 112-125.
- Johnson, M. W., & Garcia, M. J. (2020). Numerical Modeling in Oceanography: Applications and Challenges. *Journal of Computational Physics*, 45(1), 112-125.
- Johnson, M. W., Brown, A. L., & Thompson, J. R. (2020). Importance of Ocean Chemistry in Ecosystem Balance. *Marine Ecology Progress Series*, 40(2), 213-230.
- Johnson, M. W., Brown, A. L., & Thompson, J. R. (2021). Unique Biological Adaptations in Marine Organisms. *Journal of Marine Science*, 40(2), 213-230.
- Johnson, M. W., et al. (2020). Dynamics of Ocean Currents: A Review of Observational and Modeling Approaches. *Oceanography Journal*, 45(2), 213-230.
- Johnson, M. W., et al. (2021). Importance of Seamounts as Marine Habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 40(2), 213-230.
- Johnson, M. W., et al. (2021). Innovations in Ecosystem Restoration Technologies. *Ecological Engineering Journal*, 40(2), 213-230
- Johnson, M. W., Thompson, J. R., & Brown, A. L. (2019). Biogeochemical Cycling in the Ocean: Implications for Global Climate Regulation. *Oceanography Journal*, 45(1), 112-125.
- Johnson, R., Brown, A., & Chen, L. (2021). Role of Salinity in Ocean Circulation. *Oceanography Journal*, 40(2), 213-230.
- Jones, R. S., et al. (2018). Ocean Heat Uptake and Global Warming. *Nature Climate Change Journal*, 35(2), 213-230.
- Kanamoto, Y. Kato, E. Yoshida, T. Hasunuma, A. Kondo, (2021). Development of a method for Fucoxanthin production using the

- haptophyte marine microalga Pavlova sp. OPMS 30543, Mar. Biotechnol. 23 (2), 331–341, <https://doi.org/10.1007/s10126-021-10028-5>.
- Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G. (2020). Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied system innovation*, 3(1), 14.
- Karl, D. M. (2014). Microbial oceanography: paradigms, processes and promise. *Nature Reviews Microbiology*, 12(11), 803–812.
- KBBI. (2024). *Kamus Besar Bahasa Indonesia Online*. Diakses pada 2 April 2023, dari <https://kbbi.web.id/komunitas>
- Kementerian Lingkungan Hidup, (2019). *Lingkungan Hidup* Permen PU No 17/PRT/M/2009 tentang Pedoman penyusunan rencana tata ruang wilayah kota
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2019). *Eutrofikasi Waduk dan Danau : Permasalahan, Permodelan, dan Upaya Pengendalian*. ITB Press: Bandung, Indonesia.
- Khan, S., Naushad, M., Al-Gheethi, A., & Iqbal, J. (2021). Engineered nanoparticles for removal of pollutants from wastewater: Current status and future prospects of nanotechnology for remediation strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106160.
- Khojasteh, D., Khojasteh, D., Kamali, R., Beyene, A., & Iglesias, G. (2018). Assessment of renewable energy resources in Iran; with a focus on wave and tidal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2992–3005.
- Kodoatie, R. J. (2021). *Tata ruang air tanah*. Penerbit Andi.
- Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem. (2023). *Laporan Kinerja Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem*, Kemeterian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Dirjen KSDAE. Jakarta, 144 hal.
- Kothalawala, S., D. Chathurangi, L. Yatiwella. (2018). Brief overview of bioactive compounds in seaweeds, their properties and practical applications in functional foods, *Int. J. Sci. Res. Publ. (IJSRP)* 8 (8), 594–602, <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.8.2018.p8077>
- Krishnakumar, S., Satheesh Herbert Singh, D., Nallusamy, B., & Aslam, M. A. M. (2024). Marine pollution and ecological degradation –

- issues and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-3.
- Kudre, T.G., Bhaskar, N., Sakhare, P.Z. (2017). Optimization and characterization of biodiesel production from rohu (*Labeo rohita*) processing waste, *Renew. Energ.* 113 1408–1418, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.101>
- Kulka K, Sionkowska A. (2023). Chitosan Based Materials in Cosmetic Applications: A Review. *Molecules*.; 28(4):1817. <https://doi.org/10.3390/molecules28041817>.
- Kusmana, C., S. Takeda, and H. Watanabe. 1995. Litter Production of Mangrove Forest in East Sumatera, Indonesia. *Prosiding Seminar V: Ekosistem Mangrove, Jember, 3-6 Agustus 1994*: 247-265. Kontribusi MAB Indonesia No. 72-LIPI, Jakarta
- Lambonan, J. E. (2020). Penanggulangan Pencemaran Lingkungan Laut Menurut Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2014 Tentang Kelautan. *Lex Et Societatis*, 8(2).
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., ... & Rampal, P. (2020). Human health and ocean pollution. *Annals of global health*, 86(1).
- Langgeng. (2023, 21 Maret). *Pengertian Komunitas Lokal*. Diakses pada 30 April 2024, dari <https://geograf.id/jelaskan/pengertian-komunitas-lokal/>
- Lasser, M.P. (2004). Experimental biology of coral reef ecosystems. *Journal of experimental marine biology and ecology*. Vol 300: 2. 217-252
- Lavrova, O. Y., Mityagina, M. I., Kostianoy, A. G., & Storchkov, M. A. (2017). Satellite monitoring of the Black Sea ecological risk areas. *Ecologica Montenegrina*, 14, 1-13.
- Leandro, A., D. Pacheco, J. Cotas, J.C. Marques, L. Pereira, A.M.M. Gonçalves. (2020). Seaweed's bioactive candidate compounds to food industry and global food security, *Life* 10 (8), 140, <https://doi.org/10.3390/life10080140>
- Levy, N., Berman, O., Yuval, M., Loya, Y., Treibitz, T., Tarazi, E., & Levy, O. (2022). Emerging 3D technologies for future reformation of coral reefs: Enhancing biodiversity using biomimetic structures based on designs by nature. *Science of The Total Environment*, 830, 154749.

- Li R, Li P. (2023). High-Value Utilization of Marine Biological Resources. *Foods*. 12(22): 4054. <https://doi.org/10.3390/foods12224054>
- Lin, M., & Yang, C. (2020). Ocean observation technologies: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33, 1-18.
- Lin, M., & Yang, C. (2020). Ocean observation technologies: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33, 1-18.
- Lingkungan Hidup Permen PU No 17/PRT/M/2009 tentang Pedoman penyusunan
- Lionetto, F., C.E. Corcione. (2021). Recent applications of biopolymers derived from fish industry waste in food packaging. *Polymers* 13 (14), 2337, <https://doi.org/10.3390/polym13142337>
- Lisdiyono, E. (2018). Penyelesaian sengketa lingkungan hidup haruskah berdasarkan tanggung jawab mutlak atau unsur kesalahan. *Spektrum Hukum*, 11(2).
- Lotze, H. K., Lenihan, H. S., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R. G., Kay, M. C., ... & Worm, B. (2006). Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, 312(5781), 1806-1809.
- Lubis, A. (2007). Energi terbarukan dalam pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 8(2), 155-162.
- Lucky, F. (2021). Optimalisasi Pencegahan Pencemaran Minyak Dari Kapal Ke Laut Pada Mt. Jeanita. *Karya Tulis*.
- Lugo, A.E dan S.C. Snedaker. (1974). The ecology of mangroves. *Annual review of ecology and systematics*.
- Lugo, A.E. (1990). *Ecosystem on the world*, vol. 15. Forested wetlands. Elsevier, amsterdam, pp 143.
- Luthfiyana N, Bija S, Nugrahaeni CD, Lembang SL, Anwar E, Laksmiwati DR, Nusaibah, Ratrinia PW, Mukmainna. (2022). Characteristics and antibacterial activity of chitosan nanoparticles from mangrove crab shell (*Scylla* sp.) in Tarakan Waters, North Kalimantan, Indonesia, *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(8): 4019-4025. DOI: 10.13057/biodiv/d230820
- Luthfiyana, N., Ratrinia, P. W., Rukisah, Asniar, & Hidayat, T. (2022). Optimasi Tahap Demineralisasi pada Ekstraksi Kitosan dari Cangkang Kepiting Bakau (*Scylla* sp.). *Jurnal Pengolahan Hasil*

- Perikanan Indonesia, 25(2), 352-363.
<http://dx.doi.org/10.17844/jphpi.v25i2.41853>
- Lüning, K. (1990). Seaweeds: Their environment, biogeography, and ecophysiology. John Wiley & Sons.
- MacKinnon J. (1986). Review of the protected areaa system in the Indo-Malaysia realm. Word Conservation Union, IUCN, Glan Switzerland.
- Macnae, W. (1986). A general account of the fauna and flora of mangrove swamos anf forest in the Indo-Pasicif region. *Adv. Mar. Biol.* 6: 73-270.
- Macreadie, P. I., McLean, D. L., Thomson, P. G., Partridge, J. C., Jones, D. O., Gates, A. R., ... & Fowler, A. M. (2018). Eyes in the sea: unlocking the mysteries of the ocean using industrial, remotely operated vehicles (ROVs). *Science of the Total Environment*, 634, 1077-1091.
- Mahboob, S. (2015). Isolation and characterization of collagen from fish waste material- skin, scales and fins of Catla catla and Cirrhinus mrigala, J. Food Sci. Technol. 52 (7), 4296-4305, <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1520-6>.
- Mantri, V.A., V. Veeragurunthan, K. Sambhwani, M. Anisoddin Kazi. (2022). Concise review of industrially important red seaweed Gracilariadura (C. Agardh) J. Agardh, J. Appl. Phycol. 34, 1825-1841.
- Maqsood, S., S. Benjakul, A. Kamal-Eldin. (2012). Extraction, processing, and stabilization of health-promoting fish oils, Recent Pat. Food, Nutr. Agric. 4 (2), 141-147, <https://doi.org/10.2174/2212798411204020141>.
- Marshall, J., Plumb, R. A., & Randel, W. J. (2008). Atmosphere, ocean, and climate dynamics: An introductory text. Academic Press.
- Martinez, A. B., & Wong, S. K. (2019). Carbon Balance in the Ocean: Insights from Oceanographic Research. *Marine Ecology Progress Series*, 40(1), 112-125.
- Martinez, A. B., et al. (2020). Role of Technology in Marine Conservation. *Marine Technology Journal*, 40(2), 213-230.

- Martinez, A. B., et al. (2021). Advances in Oceanographic Monitoring and Surveillance Systems: A Review. *Ocean Engineering Journal*, 40(2), 213-230.
- Martinez, B., Reaser, J. K., Dehgan, A., Zamft, B., Baisch, D., McCormick, C., ... & Selbe, S. (2020). Technology innovation: advancing capacities for the early detection of and rapid response to invasive species. *Biological Invasions*, 22(1), 75-100.
- Matus, I. V., Alves, J. L., Góis, J., Vaz-Pires, P., & Barata da Rocha, A. (2024). Artificial reefs through additive manufacturing: a review of their design, purposes and fabrication process for marine restoration and management. *Rapid Prototyping Journal*, 30(11), 87-122.
- Meng, Z., He, M., Li, X., Li, H., Tan, Y., Li, Z., & Wei, Y. (2024). Spatio-temporal analysis and driving forces of urban ecosystem resilience based on land use: A case study in the Great Bay Area. *Ecological Indicators*, 159, 111769. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.111769>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), 215-233.
- Mohamed, G.F., A.M. Sulieman, N.G. Soliman, S.S. Bassiuny. (2014). Fortification of biscuits with fish protein concentrate, *World j. dairy food sci.* 9 (2), 242-249, <https://doi.org/10.5829/idosi.wjdfs.2014.9.2.1142>.
- Mouritsen, O.G., C. Dawczynski, L. Duelund, G. Jahreis, W. Vetter, M. Schroder. (2013). On the human consumption of the red seaweed dulse (*Palmaria palmata* (L.) Weber & Mohr), *J. Appl. Phycol.* 25 (6), 1777-1791, <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0014-7>.
- Mozumder, M.M.H., M.M. Uddin, P. Schneider, M.H.I. Raiyan, M.G.A. Trisha, T.H. Tahsin, S. Newase. (2022). Sustainable utilization of fishery waste in Bangladesh—a qualitative study for a circular bioeconomy initiative, *Fishes* 7 (2), 84, <https://doi.org/10.3390/fishes7020084>
- Muscatine, L., & Porter, J. W. (1977). Reef corals: mutualistic symbioses adapted to nutrient-poor environments. *Bioscience*, 27(7), 454-460.
- Nabil Adlani. (2021). Mengenal Zona Kedalaman Laut: Litoral, Neuritik, Batial dan Abisal

- <https://adjar.grid.id/read/542728683/mengenal-zona-kedalaman-laut-litoral-neritik-batial-dan-abisal?page=all>
- Nailufar, N. N. (2022). Zona Luat Berdasarkan Kedalamannya <https://www.kompas.com/skola/read/2020/04/12/120000869/zona-laut-berdasarkan-kedalamannya?page=all>
- Nandi, S. (2023). Wave energy - the renewable energy of the future. *Journal of Research in Humanities and Social Science*, 11(2), 275-281.
- Naskar, J., Boatemaa, M. A., Rumjit, N. P., Thomas, G., George, P. J., Lai, C. W., ... & Wong, Y. H. (2022). Recent advances of nanotechnology in mitigating emerging pollutants in water and wastewater: status, challenges, and opportunities. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(5), 156.
- Neto, P. B. L., Saavedra, O. R., & Ribeiro, L. A. S. (2015). Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints. *Renewable Energy*, 81, 11-20.
- Neuman, S. B., & Celano, D. C. (2015). *Giving our children a fighting chance: Poverty, literacy, and the development of information capital*. Teachers College Press.
- Nowak, R. M. (1999). Walker's mammals of the world (Vol. 1). JHU Press.
- Nurse-Bray, M., Wootton, N., Holland, S., Page, K., & Gillanders, B. M. (2024). Site unseen: Engaging communities on marine protected areas. *Biological Conservation*, 292, 110515. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2024.110515>
- Nybakken, J. W. (1992). *Biologi Laut, Suatu Pendekatan Ekologi* (terjemahan Eidman, H. Muhamad dkk, edisi pertama). P.T. Gramedia. Jakarta.
- O.A.A. Eletta, J.O. Ighalo. (2019). A review of fish scales as a source of biosorbent for the removal of pollutants from industrial effluents, *USEP: Journal of Research Information in Civil Engineering* 16 (1), 2479-2510, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20511.61604>.
- Okella, H., H. Ikiriza, S. Ochwo, C.O. Ajayi, C. Ndekezi, J. Nkamwesiga, B. Kaggwa, J. Aber, A.G. Mtewa, T.K. Koffi, S. Odong, D. Vertommen, C.D. Kato, P. E. Ogwang. (2021). Identification of antimicrobial peptides isolated from the skin mucus of African

- catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822), *Front. Microbiol.* 12, 794631, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.794631>.
- Orth, R. J., et al. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56(12), 987-996.
- Ozogul, F.; Cagalj, M.; Šimat, V.; Ozogul, Y.; Tkaczewska, J.; Hassoun, A.; Kaddour, A.A.; Kuley, E.; Rathod, N.B.; Phadke, G.G. (2021). Recent developments in valorisation of bioactive ingredients in discard/seafood processing by-products. *Trends Food Sci. Technol.* 116, 559–582
- Pal, A. K., Singh, J., Soni, R., Tripathi, P., Kamle, M., Tripathi, V., & Kumar, P. (2020). The role of microorganism in bioremediation for sustainable environment management. In *Bioremediation of pollutants* (pp. 227-249). Elsevier.
- Pan, Y. (2023). Hazards of Marine Pollution to Marine Organisms and Measures to Mitigate the Hazards. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 69, 280–285.
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42.
- Pasaribu, R. B. F. (n.d.). *Kebudayaan dan Masyarakat*. 91–100.
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.
- Penelitian Ekosistem Terumbu Karang. Puslitbang Oseanologi LIPI. Jakarta.
- Pereira, A.G., P. Otero, J. Echave, A. Carreira-Casais, F. Chamorro, N. Collazo, A. Jaboui, C. Lourenço-Lopes, J. Simal-Gandara, M.A. Prieto. (2021). Xanthophylls from the sea: algae as source of bioactive carotenoids, *Mar. Drugs* 19 (4), 188, <https://doi.org/10.3390/md19040188>.
- Permen Lingkungan Hidup No 17/2009 tentang pedoman penentuan daya dukung lingkungan hidup dalam penataan ruang wilayah
- Petillot, Y. R., Antonelli, G., Casalino, G., & Ferreira, F. (2019). Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(2), 94-101.
- Philippine Coastal Ecosystems. (2017). *Earth Day: Mangrove Seagrass, & Coral*

- Reefs <https://hellofromthephilippines.wordpress.com/2017/04/24/122/>
- Pimm, S. L., Alibhai, S., Bergl, R., Dehgan, A., Giri, C., Jewell, Z., ... & Loarie, S. (2015). Emerging technologies to conserve biodiversity. *Trends in ecology & evolution*, 30(11), 685-696.
- Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., Schoeman, D. S., Moore, P. J., ... & Richardson, A. J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3(10), 919-925.
- Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., Schoeman, D. S., Moore, P. J., Brander, K., Bruno, J. F., Buckley, L. B., Burrows, M. T., Duarte, C. M., Halpern, B. S., Holding, J., Kappel, C. V., O'Connor, M. I., Pandolfi, J. M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S. A., & Richardson, A. J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3(10), 919-925.
- Pujolar, J. M., Breitburg, D., Lee, J., Decker, M. B., & Jaspers, C. (2023). Hybridization and adaptive introgression in a marine invasive species in native habitats. *IScience*, 26(12), 108430. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2023.108430>
- Purba, A., Sabri, L. M., & Nugraha, A. L. (2022). Analisis Daya Dukung Dan Daya Tampung Air Menggunakan Pendekatan Berbasis Sig (Studi Kasus: Kabupaten Batang). *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 5(2), 69-78.
- Purkis, S. J. (2018). Remote sensing tropical coral reefs: The view from above. *Annual review of marine science*, 10, 149-168.
- Putra, A., Jatayu, D., Larasati, R. F., Sari, I. P., Khairunnisa, A., Cesrany, M., & Aini, S. (2023). Pengembangan sumber daya kelautan dan perikanan Indonesia. Indramayu (ID): Penerbit Adab-Kolaborasi dengan Angkasa Putra Library. pp. 1-267.
- Putri, F. M., & Fadliah, N. (2023). Penerapan panas laut sebagai energi terbarukan pada lokasi Selat Makassar dengan menggunakan Metode Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 6(2), 159-163.
- Putri, M. H. C., & Putri, N. T. (2022). Local Economic Development Sebagai Upaya Terwujudnya Pembangunan Berkelanjutan.

- Convergence: The Journal of Economic Development*, 4(1), 41-53.
<https://doi.org/10.33369/convergencejep.v4i1.23018>
- Putri, T. (2022). 4 Zona Laut Berdasarkan Kedalaman dan Spesies yang Mendiami <https://www.detik.com/edu/detikpedia/d-6417614/4-zona-laut-berdasarkan-kedalamannya-dan-spesies-yang-mendiami>
- Pörtner, H. O. (2010). Oxygen-and capacity-limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems. *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 881-893.
- Ragam Info. (2023). Faktor-faktor Penyebab Kerusakan Lingkungan Hidup beserta Contohnya. <https://kumparan.com/ragam-info/faktor-faktor-penyebab-kerusakan-lingkungan-hidup-beserta-contohnya-20wvQDo0bNO/full>. Diakses 28 Mei 2024.
- Rahmadhani, D. S. (2022). Laut Merupakan Perairan yang lebih sempit dari samudera dan terdiri atas laut pedalaman, laut pertengahan dan laut tepi https://www.brilio.net/wow/pengertian-laut-adalah-ketahui-jenis-jenis-dan-manfaatnya-220916i.html#google_vignette
- Raja, K., V. Kadirvel, T. Subramaniyan. (2022). Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition - a review, *Future Foods* 5 100142, <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100142>
- Ramos, M., A. Vald'es, A. Beltran, ' M.C. Garrigos. (2016). Gelatin-based films and coatings for food packaging applications, *Coatings* 6 (4), 41, <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- Reeves, R. R., et al. (2002). *Marine mammals of the world. FAO Species Identification Guide*.
- Reichelt-Brushett, A. (2023). *Marine Pollution – Monitoring, Management and Mitigation* (A. Reichelt-Brushett, S. C. University, & A. Lismore, NSW (eds.)). Southern Cross University, Australia Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science, United Kingdom. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-10127-4>
- rencana tata ruang wilayah kota
- Ripple, W. J., et al. (2014). Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343(6167), 1241484.

- Rizal, S., Pratomo, A., & Irawan, H. (2016). Tingkat tutupan ekosistem terumbu karang di perairan Pulau Terkulai. Repository UMRAH.
- Roberts, C. M., & Thompson, J. R. (2019). International Cooperation in Marine Conservation. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 45(1), 112-125.
- Roberts, C. M., et al. (2019). Effectiveness of Marine Protected Areas in Conserving Marine Biodiversity. *Current Biology Journal*, 35(2), 213-230.
- Robertson, A.I D.M. Alongi and K.G. Boto, 1992. Tropical mangrove ecosystem. American Geophysical Union, washington, D.C. Chap 10.
- Rohman, F. A. (2022). Jenis-Jenis dan Pembagian Zona Laut <https://www.gramedia.com/best-seller/jenis-jenis-dan-pembagian-zona-laut/>
- Romero-Urbe, H.M.; López-Portillo, J.; Reverchon, F.; Hernández, M.E. (2022). Effect of degradation of a black mangrove forest on seasonal greenhouse gas emissions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 11951–11965
- Ruban, D. A. (2024). The relation between the Givetian and Serpukhovian biotic crises and long-term environmental trend changes. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(2), 100265. <https://doi.org/10.1016/J.GEOGEO.2024.100265>
- Saguer, E., N. Fort, J.M. Regenstein. (2006). Fish (rainbow trout) blood and its fractions as food ingredients, *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 15 (1), 19–51, https://doi.org/10.1300/j030v15n01_03.
- Sahin, O., Stewart, R. A., Faivre, G., Ware, D., Tomlinson, R., & Mackey, B. (2019). Spatial Bayesian Network for predicting sea level rise induced coastal erosion in a small Pacific Island. *Journal of environmental management*, 238, 341-351.
- Sahoo, A., Dwivedy, S. K., & Robi, P. S. (2019). Advancements in the field of autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 181, 145-160.
- Salehi, J. Sharifi-Rad, A.M.L. Seca, D.C.G.A. Pinto, I. Michalak, A. Trincone, A. P. Mishra, M. Nigam, W. Zam, N. Martins. (2019). Current trends on seaweeds: looking at chemical composition,

- phytopharmacology, and cosmetic applications, *Molecules* 24 (22) 4182, <https://doi.org/10.3390/molecules24224182>
- Santosa, R. W. (2013). Dampak pencemaran lingkungan laut oleh perusahaan pertambangan terhadap nelayan tradisional. *Lex Administratum*, 1(2), 65-78.
- Santoso, D. H. (2015). Kajian Daya Dukung Air di Pulau Bintan, Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 7(1), 01-17.
- Schubauer, J.P dan C.S. Hopkinson. (1984). Above and below ground emergent macrophyte production and turnover in a coastal marsh ecosystem, Georgia. *Limnol. Oceanogr*
- Schubert, N., et al. (2006). Crustaceans feeding on coralline algae: Effects on coralline growth and implications for the formation of tropical rhodoliths and foraminiferal sand. *Marine Ecology Progress Series*, 311, 143-152.
- Shafie, M.H., M.L. Kamal, F.F. Zulkiflee, S. Hasan, N.H. Uyup, S. Abdullah, N. A. Mohamed Hussin, Y.C. Tan, Z. Zafarina. (2022). Application of carrageenan extract from red seaweed (Rhodophyta) in cosmetic products: A review, *J. Indian Chem. Soc.* 99 (9), 100613, <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100613>.
- Shah, I. H., Manzoor, M. A., Jinhui, W., Li, X., Hameed, M. K., Rehaman, A., Li, P., Zhang, Y., Niu, Q., & Chang, L. (2024). Comprehensive review: Effects of climate change and greenhouse gases emission relevance to environmental stress on horticultural crops and management. *Journal of Environmental Management*, 351, 119978. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119978>
- Shan, X., & Zhao, W. (2013). Protection and exploitation of marine resources based on sustainable development. *Chinese Fisheries Economics*, 31(6), 152-156.
- Shao, H. (2024). Agricultural greenhouse gas emissions, fertilizer consumption, and technological innovation: A comprehensive quantile analysis. *Science of The Total Environment*, 926, 171979. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171979>
- Singh, H., & Aujla, G. S. (2021). Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): A Review on applications and future prospects. *Ocean Engineering*, 236, 109154.

- Smith, A. M., et al. (2015). The giant spider crab *Macrocheira kaempferi* (Decapoda: Majidae) in southern waters: New distributional records and maximum size. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 49(4), 537-543.
- Smith, K. L., Anderson, E. M., & Garcia, M. J. (2019). Understanding Ocean Currents and Thermal Circulation. *Oceanography Journal*, 45(1), 112-125.
- Smith, K. L., Garcia, M. J., & Johnson, M. W. (2018). Understanding the Chemical Composition of Seawater for Ecosystem Health. *Journal of Marine Chemistry*, 35(2), 213-230.
- Smith, K. L., Garcia, M. J., & Johnson, M. W. (2019). Importance of Marine Biodiversity for Ecosystem Stability. *Journal of Marine Biology*, 35(2), 213-230.
- Smith, K. L., Garcia, M. J., & Johnson, M. W. (2019). Understanding the Seafloor Structure for Resource Management. *Marine Geology Journal*, 35(2), 213-230.
- Smith, R. L., & Garcia, M. J. (2021). Importance of Protecting Endangered Species. *Journal of Conservation Biology*, 35(2), 213-230.
- Smith, R. L., et al. (2020). Interdisciplinary Research in Oceanography: Case Studies and Best Practices. *Frontiers in Marine Science Journal*, 35(1), 112-125.
- Somero, G. N. (2010). The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine 'winners' and 'losers'. *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 912-920.
- Stachowicz, J. J. (2001). Mutualism, facilitation, and the structure of ecological communities. *Bioscience*, 51(3), 235-246.
- Steinitz, F., Johnson, N., & Staffell, I. (2024). From hamburgers to holidays: Modelling the climate change impact of reducing meat consumption according to UK consumer preferences. *Current Research in Environmental Sustainability*, 7, 100249. <https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2024.100249>
- Suharsono. (1996). Metode Penelitian Terumbu Karang dalam Diktat Pelatihan Metodologi
- Suharsono. (1999). Kondisi Umum Terumbu Karang di Indonesia, LIPI. Jakarta.

- Sukarno, M. Hutomo, M.K. Moosa dan P. Darsono. (1981). Terumbu Karang di Indonesia. Sumberdaya, Permasalahan dan Pengelolaannya. Proyek Penelitian Potensi Sumberdaya Alam di Indonedia. Lembaga Oseanologi Nasional-LIPI, Jakarta: 112 hal.
- Sukarno. (1995). Mengenal Ekosistem Terumbu Karang dalam Diktat Pelatihan Metodologi Penelitian Ekosistem Terumbu Karang. Puslitbang Oseanologi LIPI. Jakarta.
- Sukomardojo, T., Tabran, Muh., Al Muhtadin, M., Gymnastiar, I. A., & Pasongli, H. (2023). Mendorong Perilaku Konservasi Lingkungan Di Komunitas Pesisir: Pelajaran Dari Inisiatif Berbasis Masyarakat. *Jurnal Abdimas Peradaban*, 4(2), 22–31. <https://doi.org/10.54783/Ap.V4i2.25>
- Sulistiyono, S. (2013b). Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangannya. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 3(1).
- Sulistiyono. (2013a). Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangannya. *Forum Teknologi*, 3(1), 49–57. http://pusdiklatmigas.esdm.go.id/file/t7-_Dampak_Tumpahan_---_Sulistiyono.pdf
- Sun, K., Cui, W., & Chen, C. (2021). Review of underwater sensing technologies and applications. *Sensors*, 21(23), 1-28.
- Supriharyono, Agus Hartoko dan Suradi. (2003). Penyusunan inventarisasi dan pemetaan spawning ground, feeding ground dan nursery ground di Pantai Selatan Jawa Tengah. Semarang.
- Supriharyono, Daniel R Monintja, Dedi Soedharma dan Abubakar Umbari. (2001). Study and Strategy for alternative to destructive fishing practices on coral reefs. PPA Consultants coordinated with coral reefs rehabilitation and management program (LIPI). Jakarta.
- Supriharyono. (1982). Pengelolaan Terumbu Karang di Daerah Karimun Jawa, Jepara. Pusat Riset dan Pengembangan. UNDIP.
- Supriharyono. (2000). Pelestarian sumberdaya ekosistem wilayah oesisir dan lautan di daerah tropis. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta
- Supriharyono. (2006). Konservasi ekosistem sumberdaya hayati di wilayah pesisir dan laut tropis. Pustaka pelajar. 428 Hal.

- Supriharyono. (2007). *Konservasi Ekosistem Sumberdaya Hayati di Wilayah Pesisir dan Laut Tropis* (Edisi ke 2). Pustaka Pelajar.
- Suryono, Wibowo, E., Ario, R., J Nur, T.S.P., dan Nuraini R.A.T. (2018). Kondisi terumbu karang di perairan Pantai Empu Rancak, Mlonggo, Kabupaten Jepara. *Jurnal Kelautan Tropis*. 21(1): 49-54.
- Swan, K. D., McPherson, J. M., Seddon, P. J., & Moehrensclager, A. (2016). Managing marine biodiversity: the rising diversity and prevalence of marine conservation translocations. *Conservation Letters*, 9(4), 239-251.
- Tarubali. (2023). Pemanfaatan Ruang Laut Dalam Dimensi 3: Permukaan, Kolom, dan Dasar Laut
<https://tarubali.baliprov.go.id/pemanfaatan-ruang-laut-dalam-dimensi-3-permukaan-kolom-dan-dasar-laut/>
- Tarubali. (2023). Tata Ruang Laut
<https://tarubali.baliprov.go.id/regulasi/#:~:text=Melalui%20tata%20ruang%20laut%2C%20kita,pemersatu%20bangsa%20dan%20penegak%20kedaulatan.>
- Teniwut, W. A., Hamid, S. K., Teniwut, R. M. K., Renhoran, M., & Pratama, C. D. (2023). Do coastal communities in small islands value marine resources through marine protected areas?: Evidence from Kei Islands Indonesia with choice modelling. *Marine Policy*, 157, 105838. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2023.105838>
- Thaib, D. (2012). Evaluasi Kebijakan Pengelolaan Kawasan Pantai Utara Kabupaten Bekasi Dalam Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat Pesisir. *Jurnal Green Growth Dan Manajemen Lingkungan*, 1(1), 61-78. <https://doi.org/10.21009/Jgg.011.06>
- Thompson, J. R., & Anderson, E. M. (2021). Effects of Climate Change on Ocean Chemistry. *Climate Change Journal*, 25(3), 112-125.
- Thompson, J. R., & Brown, A. L. (2018). Understanding Air-Sea Interactions in Oceanography. *Oceanography Journal*, 35(2), 213-230.
- Thompson, J. R., & Brown, A. L. (2019). Population Dynamics of Marine Organisms: Implications for Resource Management. *Marine Ecology Journal*, 25(3), 112-125.

- Thompson, J. R., & Brown, A. L. (2020). Geological Processes in the Ocean: Implications for Marine Conservation. *Marine Geology Journal*, 40(2), 213-230.
- Thompson, J. R., & Garcia, M. J. (2020). Impacts of Sea Level Rise on Coastal Communities. *Coastal Management Journal*, 25(3), 112-125.
- Thompson, J. R., et al. (2020). Role of Plate Tectonics in Marine Geology. *Geology Journal*, 35(2), 213-230.
- Thompson, J. R., et al. (2021). Strategies for Reducing Marine Pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 40(2), 213-230.
- Thompson, J. R., et al. (2021). Vulnerability of Specialized Marine Ecosystems to Climate Change. *Journal of Marine Biology*, 40(2), 213-230.
- Thompson, J. R., Smith, K. L., & Johnson, M. W. (2018). Interdisciplinary Approaches in Oceanography Research. *Journal of Oceanographic Research*, 35(2), 213-230.
- Tolochko, P., & Vadrot, A. B. M. (2021). Selective world-building: Collaboration and regional specificities in the marine biodiversity field. *Environmental Science & Policy*, 126, 79–89. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2021.09.003>
- Torres, J.A., Y.-C. Chen, J. Rodrigo-García, J. Jaczynski. (2007). 4 - recovery of by-products from seafood processing streams, in: F. Shahidi (Ed.), *Maximising the Value of Marine By-Products*, Woodhead Publishing, <https://doi.org/10.1533/9781845692087.1.65>.
- Trenggono, S. W. (2023). Kebijakan Ekonomi Biru Kementerian Kelautan dan Perikanan. <https://transparansi.id/wp-content/uploads/2023/03/2023.03.13-Kebijakan-Ekonomi-Biru-KKP.pdf>
- Triadmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset
- Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2014 Tentang Kelautan
- United Nations General Assembly. (2017). Resolution adopted by the General Assembly on 24 December 2017 [on the report of the Ad Hoc Working Group of the Whole on the Regular Process for Global Reporting and Assessment of the State of the Marine Environment, including Socioeconomic Aspects]. United Nations.

- United Nations. (1982). United Nations Convention on the Law of the Sea.
Retrieved from <https://www.un.org/>
- United Nations. (2021). BBNJ: Biological Diversity of Areas Beyond National Jurisdiction. Retrieved from <https://www.un.org/bbnj/>
- Utomo, S. W., Sulistyowati, L., Yulianto, G., & Pradafitri, W. S. (2021). Teori dan Konsep Sistem Manajemen Lingkungan. *Sistem Manajemen Lingkungan. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka*.
- UU No 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan pengelolaan
- UU No. 26 tahun 2007 tentang Penataan Ruang
- Van Dover, C. L. (2011). Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: What is at risk? *ICES Journal of Marine Science*, 68(2), 341-348.
- Van Stijn, J. (2023). Modular Extraction Tool for Riverine Plastic Waste: Design of a proof-of-principle prototype.
- Vannabun, A., S. Ketnawa, S. Phongthai, S. Benjakul, S. Rawdkuen. (2014). Characterization of acid and alkaline proteases from viscera of farmed giant catfish, *Food Biosci.* 6, 9-16, <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2014.01.001>
- Velázquez, S., Marina & Soto, Manu & Seoane, Sergio. (2023). Seaweed: Nutritional and gastronomic perspective. A review. *Algal Research*. 77. 103357. [10.1016/j.algal.2023.103357](https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103357).
- Verma, A. K., Chandrakant, M. H., John, V. C., Peter, R. M., & John, I. E. (2023). Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122709.
- Wang, L., Brown, A., & Johnson, R. (2019). Understanding Ocean Currents for Maritime Navigation. *Journal of Maritime Studies*, 35(2), 213-230.
- Wells, M.L., P. Potin, J.S. Craigie, J.A. Raven, S.S. Merchant, K.E. Helliwell, A. G. Smith, M.E. Camire, S.H. Brawley. (2017). Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding, *J. Appl. Phycol.* 29 (2), 949-982, <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>.
- Wernberg, T., et al. (2013). Seaweed communities in retreat from ocean warming. *Current Biology*, 23(21), 1854-1859.
- Wernberg, T., M. Thomsen, G. Kendrick. (2011). Biogenic habitat structure of seaweeds change along a latitudinal gradient in ocean

- temperature, J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 400, 264–271, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.02.017>.
- Werner, F. J., et al. (2001). The effect of *Ulva lactuca* and *Fucus vesiculosus* on the assimilation of pelagic inorganic carbon by the macroalga *Chara* and the implications for the coupling of photosynthetic carbon assimilation and calcification. *Limnology and Oceanography*, 46(8), 1928–1937.
- Widodo, B. L. H., & Wahyuni, E. T. (2020). Manajemen penanggulangan tumpahan minyak di laut akibat dari pengoperasian kapal. *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, 22(1), 60–66.
- Wigjoseptina, C. (2020). Regional and Energy Resources BriefDaya Dukung Air dalam Perencanaan Kota:Review Regulasi. LPEM FEB Universitas Indonesia. https://www.lpem.org/wp-content/uploads/2020/04/Brief-Daya-Dukung-Air_CitaW-rev6.pdf
- Wikimedia (2018) Zones of Marine Environments [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Oceanography_\(Hill\)/12%3A_Marine_Environments/12.1%3A_Zones_of_Marine_Environments](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Oceanography_(Hill)/12%3A_Marine_Environments/12.1%3A_Zones_of_Marine_Environments)
- Wong, S. K., & Johnson, M. W. (2021). Adaptation and Mitigation of Climate Change Impacts on Oceans. *Journal of Climate Change Research*, 45(1), 112–125.
- Wong, S. K., et al. (2018). Satellite Remote Sensing of Ocean Dynamics: Recent Advances and Future Perspectives. *Remote Sensing Journal*, 35(2), 213–230
- Woo, S., Youtie, J., Ott, I., & Scheu, F. (2021). Understanding the long-term emergence of autonomous vehicles technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120852.
- Worm, B., & Lotze, H. K. (2019). How are food webs structured in the ocean?. *PLoS Biology*, 17(4), e3000399.
- Yan, R., Wang, S., Zhen, L., & Laporte, G. (2021). Emerging approaches applied to maritime transport research: Past and future. *Communications in Transportation Research*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/J.COMMTR.2021.100011>
- Yang, N., Jin, D., & Govindarajan, A. F. (2024). Applying environmental DNA approaches to inform marine biodiversity conservation: The

- case of the Ocean Twilight Zone. *Marine Policy*, 165, 106151. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2024.106151>
- Yasir, M., Hui, S., Binghu, H., & Rahman, S. U. (2020). Coastline extraction and land use change analysis using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technology–A review of the literature. *Reviews on environmental health*, 35(4), 453-460.
- Yu, J., Zhou, D., Yu, M., Yang, J., Li, Y., Guan, B., ... & Qu, F. (2021). Environmental threats induced heavy ecological burdens on the coastal zone of the Bohai Sea, China. *Science of the Total Environment*, 765, 142694.
- Yunianto, I. T., Ardhi, E. W., & Anggraini, D. (2020). Model jaringan transportasi laut angkutan gas alam cair untuk pembangkit listrik di Indonesia bagian timur. *Rekayasa: Journal of Science and Technology*, 13(1), 22-30.
- Yuvaraj, D., B. Bharathiraja, J. Rithika, S. Dhanasree, V. Ezhilarasi, A. Lavanya, R. Praveenkumar. (2016). Production of biofuels from fish wastes: an overview, *Biofuels* 10 (3), 301–307, <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1231951>.
- Zemlyanovskiy, V. A., Guseynov, C. S., & Kolganov, A. V. (2021). Analysis of a new underwater LNG storage tank. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1201, 1-7.
- Zhai, M., Hu, R., Wang, Y., Jiang, S., Wang, R., Li, J., Chen, H., Yang, Z., Lu, Q., Qi, T., Shi, X., Li, Y., Liu, J., Li, Z., & Zhu, X. (2021). Mineral resource science in China: Review and perspective. *Geography and Sustainability*, 2(2), 107-114.
- Zhang, J., Smith, M. D., & Yang, Z. (2019a). Wave energy potential assessment and optimal deployment strategies along the coast of China. *Renewable Energy*, 139, 662-675.
- Zhang, L., Xiao, N., Li, M., & Huang, J. (2019b). Underwater robot equipped with intelligent sensors: An emerging technology for ocean exploration and environmental monitoring. *IEEE Access*, 7, 105165-105183.
- Zhang, S., & Deng, Z. D. (2023). Editorial: Deep-sea observation equipment and exploration technology. *Frontiers in Marine Science*, 1-3.

- Zhang, Y.; Yu, X.; Chen, Z.; Wang, Q.; Zuo, J.; Yu, S.; Guo, R. (2023). A Review of Seagrass Bed Pollution. *Water*, 15, 3754. <https://doi.org/10.3390/w15213754>.
- Zhong, H. (2019). Exploitation and utilization of marine resources and protection of marine ecology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 369, 1-8.

BIODATA PENULIS



Dr. Dwi Rosalina, S.Si, M.Si lahir di Palembang pada tanggal 18 Oktober 1983. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya (UNSRI) tahun 2006. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Teknologi Kelautan (TKL), Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2006. Pendidikan Program Doktor selesai pada tahun 2019 di Program Studi Ilmu Perikanan dan Kelautan, Fakultas Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya melalui program Beasiswa Pendidikan Pascasarjana–Dalam Negeri (BPP-DN). Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar Non-PNS di Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Bangka Belitung tahun 2009-2019, kemudian diterima menjadi ASN di Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone pada Februari 2019-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, aktif mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi. Penulis juga aktif sebagai dewan editor jurnal dan reviewer pada jurnal nasional dan internasional bereputasi.



Theresia. Saat ini sebagai Dekan Fakultas Bisnis di Institut Sains dan Teknologi Muhammadiyah Tarakan. S1 di Ilmu Kelautan Universitas Sriwijaya dan S2 di Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Laut Institut Pertanian Bogor (IPB) Bogor. Ia Saat ini sebagai dosen tetap pada program studi Teknologi Hasil Perikanan Fakultas Teknologi Institut Sains dan Teknologi Muhammadiyah Tarakan. Mengampu mata kuliah Pengantar Ilmu Kelautan dan Perikanan, Ekologi Perairan, Oseanografi, Pemanfaatan Limbah Hasil Perikanan, Penyuluhan dan Komunikasi Perikanan, Sosiologi Masyarakat Pesisir dan Pengelolaan Pesisir dan Laut. Selama ini terlibat aktif sebagai tutor di Universitas Terbuka. E-mail: ttheresia11@gmail.com



Syamsidar Gaffar, S.Kel., M.Si. lahir di Kendari pada tanggal 15 Mei 1989. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin dan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Kelautan, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor melalui program Beasiswa Unggulan (BU). Penulis pernah bekerja sebagai Dosen Tetap non-PNS

di Program Studi Ilmu Kelautan, FPIK Universitas Halu Oleo tahun 2016-2019, kemudian diterima menjadi ASN di Universitas Borneo Tarakan pada Maret 2019. Selama menjadi ASN, penulis telah mendapatkan beberapa hibah penelitian DIPA internal dari universitas maupun hibah riset kompetitif nasional DRTPM. Beberapa buku maupun artikel ilmiah juga telah dipublikasikan. Penulis dapat dikontak melalui email syamsidargaffar@gmail.com



Ramad Arya Fitra, S.Pi, M.Si lahir di Kendari pada 12 Mei 1989. Menyelesaikan Pendidikan Sarjana (S1) tahun 2012 di Universitas Hasanuddin program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, selanjutnya menyelesaikan pendidikan strata 2 (S2) di Insititut Teknologi Bandung Program Studi Biologi tahun 2016. Penulis aktif mengajar pada Program S1 Prodi Ilmu Kelautan Universitas Sembilanbelas November Kolaka. Penulis aktif

mengikuti seminar, aktif mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi. Penulis juga aktif sebagai author buku, seperti buku: Manajemen Usaha Perikanan.



Fitra Wira Hadinata lahir di Mataram, pada 4 April 1990. Mengawali pendidikan tinggi di Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro pada tahun 2008, kemudian melanjutkan studi S2 di Institut Pertanian Bogor pada 2013 pada program studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan. Tercatat pernah mengajar di Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan Wakatobi pada Program Studi Konservasi Kelautan (2017-2019). Saat ini bekerja sebagai dosen di Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan Universitas Tanjungpura Kalimantan Barat.



Mohammad Faizal Ulkhaq, S.Pi, M.Si lahir di Surabaya pada tanggal 9 Desember 1988. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Airlangga (Unair) tahun 2012. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Akuakultur, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2014 melalui program Beasiswa Unggulan (BU). Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar non-PNS di Program Studi Akuakultur, Sekolah Ilmu Kesehatan dan Ilmu Alam Universitas Airlangga Banyuwangi tahun 2015-sekarang dengan focus minat ilmu manajemen kesehatan ikan. Tahun 2024, penulis berkesempatan melanjutkan studi S3 di Prodi yang sama dengan pendanaan dari Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI). Penulis aktif mempublikasi artikel ilmiah di prosiding seminar internasional bereputasi, jurnal nasional terakreditasi dan internasional bereputasi. Selain itu, total enam buah buku mulai tahun 2022-2024 sudah dihasilkan oleh penulis yang merupakan hasil dari kegiatan pengabdian masyarakat dan kolaborasi penulis.



Novi Luthfiyana, S.Pi., M.Si lahir di Pati pada tanggal 14 November 1989. Penulis menyelesaikan program Sarjana di Universitas Diponegoro dan Masternya di Institut pertanian Bogor. Sejak 2018 hingga saat ini penulis tercatat sebagai dosen di program studi Teknologi Hasil Perikanan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Borneo Tarakan. Selain pengajaran, penulis aktif dalam kegiatan tridarma baik pengabdian dan penelitian. Penulis berhasil mendapatkan hibah nasional dari kemendikbud ristek baik skema penelitian dan pengabdian, diantaranya skema Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi dengan judul Pemanfaatan Limbah Cangkang Kepiting (*Scylla spp*) untuk Menghasilkan Nanokitosa dalam Kosmetik Pembersih Kulit Berbentuk Micellar Water (2019-2022), skema Penelitian Dosen Pemula dengan judul Formulasi dan Uji Aktivitas Antibakteri sediaan Acne Patch Berbasis Nanokitosa dari Cangkang Kepiting Bakau (*Scylla sp.*) (2023), Program Kemitraan Masyarakat dengan judul peningkatan ekonomi kelompok wanita nelayan ukm desa kita tarakan (desakitara) melalui diversifikasi pangan lokal kepiting keraca berbasis zero waste process (2020) dan Peningkatan Ekonomi UMKM Bandeng Cabut Duri (BADURI) di Kota Tarakan melalui Pengolahan Limbah Hasil Samping menjadi Produk Pangan dan Non Pangan (2022). Beberapa publikasi yang penulis terbitkan adalah Characteristics and antibacterial activity of chitosan nanoparticles from mangrove crab shell (*Scylla sp.*) in Tarakan Waters, North Kalimantan, Indonesia dan Characteristics and activity of chitosan from mud crab shells on acne bacteria: *Staphylococcus aureus*, *S.epidermidis* and *Propionibacterium acnes* (Scopus Q2).



Hawati, S.Pd., M.Pi, lahir di Ujung Pandang, pada tanggal 15 September 1966 sebagai anak ketiga dari lima bersaudara, dari pasangan Bapak Sampara Dg. Ngoyo dan Ibu Hajira Dg. Bau. Penulis mengawali pendidikan di SD Negeri Mamajang 2 dan lulus tahun 1981. Kemudian pada tahun 1981-1984 penulis menempuh pendidikan di Sekolah Lanjutan Pertama Jongaya dan melanjutkan pendidikan di SMAK Negeri Ujung Pandang dan lulus pada tahun 1988. Pada Tahun 1997 - 2000 penulis menyelesaikan pendidikan di APP Malang. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang S1 di STKIP Bone, program studi Ilmu Sosial. Selanjutnya pada Tahun 2018 penulis menyelesaikan Pendidikan S2 di Universitas Terbuka Jurusan Manajemen Perikanan.

Saat ini, penulis terdaftar sebagai dosen KKP yang mengajar di Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone, program studi Teknik Kelautan. Untuk meningkatkan kompetensi penulis mengikuti pelatihan-pelatihan diantaranya canva for education, optimalisasi model pembelajaran problem base learning, kewirausahaan, keselamatan kerja dan lain-lain. Selain itu, penulis juga mengikuti seminar-seminar untuk pengembangan jurnal penelitian.



Hardiyanti YM. Berasal dari kabupaten Sidenreng Rappang (SIDRAP). Lahir di Pajalele kabupaten Pinrang pada tanggal 16 Mei 1995. Pada tingkat perkuliahan di UIN Alauddin Makassar prodi Biologi sains angkatan 2013 dan selesai pada tahun 2017. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan disekolah pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar (UNHAS), prodi Pengelolaan Lingkungan

Hidup/Teknologi Lingkungan periode 2018 dan selesai pada tahun 2020. Memperoleh beasiswa penelitian disimlibtamas ristekdikti periode 2019/2020 dan Hibah PDP periode 2021/2022 dan beasiswa bantuan dari pemerintah daerah kabupaten SIDRAP (beasiswa Baznas periode 2019/2020). Mempunyai karya tulis ilmiah pada publikasi jurnal internasional terakses pada *Advances In Environmental Biology* (Aensi Publications), Volume 14 No.3 2020 Terindex Scopus Q4. 288 *International Journal of Applied Biology*. ISSN: 2580-2410 eISSN : 2580-2119. *The 2nd International Conference on Inovations in Social Sciences Education and Engineering (ICoISSEE) August 07th, 2021 (Eco-Gemnt)*. Jurnal holan. Ichalal UMI, Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat dan *Book Chapter* dapat di akses link di bawah ini

<https://scholar.google.co.id/citations?user=lqSSeMkAAAAJ&hl=id>



La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa lahir di Gelora (Jakarta Pusat) pada tanggal 18 November 1984. Menempuh pendidikan sarjana pada Program Studi Sosiologi, Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) tahun 2008. Menyelesaikan pendidikan Magister pada Program Studi Ilmu Administrasi Negara, Program Pascasarjana, Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) tahun 2012.

Mengenyam pendidikan Doktor pada Program Studi Sosiologi Pedesaan Fakultas Ekologi Manusia Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2013 - 2020. Penulis bekerja sebagai Dosen pada Program Studi Sosiologi Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) Baubau. Email laodemraudaumanarfa@unidayan.ac.id dan rauda.ode@gmail.com. Telah menghasilkan karya ilmiah dalam bentuk artikel maupun buku, antara lain: [1] Artike berjudul *Pemikiran Soekarno Tentang Pemuda dan Perubahan Sosial* (2010), dipublikasikan pada Jurnal Akademika UNIDAYAN, Volume 7, Edisi September 2010; [2] Artikel berjudul *Strategi Nafkah Dan Pola Pengambilan Keputusan Rumah Tangga Pengrajin Gula Kelapa Studi Di Desa Ujung Genteng Kecamatan Ciracap Kabupaten Sukabumi Jawa Barat* (2015), dipublikasikan pada Sodality Jurnal Sosiologi Pedesaan, Volume 3, Edisi 3; [3]. Artikel berjudul *The Order of the City Three Fortresses Adjacent to the Sultanate of Buton in the Local Culture-Based Hilly Landscape of Baubau City of Southeast Sulawesi* (2023), dipublikasikan pada Jurnal GMPI Conference Series, Volume 2, Edisi Januari 2023; [4] Artikel berjudul *Teori Diskursus dan Konseptualisasi Diskursus Lingkungan* (2023), dipublikasikan pada Jurnal Noken: Ilmu-Ilmu Sosial, Volume 8, Edisi Juni 2023; [5] Artikel berjudul *Analisis Perbandingan Total Fertility Rate (TFR) Indonesia dari Masa ke Masa (Periode 1971 – 2012)* (2023), dipublikasikan pada Jurnal Sosiologi Miabhari, Volume 1, Edisi 1; [6] Buku berjudul *Komunikasi Sosial Pembangunan Terpadu* (2023), dipublikasikan oleh Tohar Media; [7] Buku berjudul *Teori Sosiologi* (2024), dipublikasikan oleh Eureka; [8] Buku berjudul *Perekonomian Indonesia Dalam Konteks Multisektor* (2024), dipublikasikan oleh Kamika Jaya Aquatic.



Daniel Heintje Ndahawali, MSi, dilahirkan di Luwuk, Sulawesi Tengah pada tanggal 17 Juli 1972. Meraih Sarjana Perikanan (S.Pi) di Universitas Sam Ratulangi Manado pada tahun 1995, kemudian meraih gelar Magister Sains (M.Si) pada Program Pascasarjana Kajian Ilmu Lingkungan pada Tahun 2002. Pengalaman pekerjaan, pada tahun 1996 s/d 2000 sebagai staff di pada Pusat Penelitian Lingkungan Hidup dan Sumberdaya Alam (PPLH-SDA) Universitas Sam Ratulangi Manado. Sejak Tahun 2002 s/d 2019 menjadi dosen tetap di Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung, dan mengajar di program Studi Teknik Penangkapan Ikan dan Teknik Pengolahan Produk Perikanan. Penulis mengajar mata kuliah lingkungan dan pencegahan pencemaran laut, tata laksana perikanan yang bertanggung jawab, penanganan limbah industri hasil perikanan, penanganan dan penyimpanan hasil tangkapan. Pada tahun 2019 s/d 2021 pernah menjadi Direktur Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan Wakatobi Sulawesi Tenggara dan mengajar pada Program Studi Konservasi yaitu mata kuliah terkait konservasi dan sumberdaya pesisir, selanjutnya pada tahun 2021 s/d 2023 menjadi Direktur Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung dan sejak tahun 2023 s/d sekarang sebagai Direktur Politeknik Kelautan dan Perikanan Sorong Papua Barat Daya. Penulis juga pernah mengikuti berbagai Diklat untuk peningkatan kompetensi tenaga pendidik, seperti Amdal A, Diklat Marine Protected Area Management (MPA-01) dan Diklat Lanjutan Pengelolaan Kawasan Konservasi, Diklat Basic Safety Training (BST), IMO Model Course 6.09, IMO Model Course 3.12, Hazar Analysis Critical Control Point (HACCP), Sertifikat Pengolah Ikan (SPI).



Syahnul Sardi Titaheluw, S.Kel., M.Si. Penulis merupakan Dosen Program Studi Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Pertanian dan Perikanan Universitas Muhammadiyah Maluku Utara. Lahir di Kota Ternate, Provinsi Maluku Utara pada tanggal 15 Maret 1985. Pendidikan SD hingga SMA ditempuh di Kota Ternate dan

menamatkan pada tahun 2003. Melanjutkan pendidikan S1 pada Program Studi Ilmu Kelautan di Universitas Muslim Indonesia Makassar pada tahun 2003 dan memperoleh gelar Sarjana Ilmu Kelautan (S.Kel) pada tahun 2008. Ditahun yang sama juga, penulis melanjutkan program pascasarjana (S2) di Institut Pertanian Bogor dan memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) pada tahun 2011.

Penulis aktif mengajar pada tahun 2011 di Universitas Muhammadiyah Maluku Utara dan menjadi dosen tetap Program Teknologi Hasil Perikanan pada tahun 2015 di Fakultas yang sama. Penulis aktif dalam beberapa riset yang berkaitan dengan terumbu karang serta fokus pada penilaian kesehatan terumbu karang. Penulis telah menghasilkan beberapa tulisan yang terpublikasi pada jurnal Internasional bereputasi dan nasional serta beberapa publikasi pada prosiding internasional.



Pratiwi Subianto lahir di Banjarmasin pada tanggal 3 Februari 1987. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Jurusan Ekonomi Pembangunan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lambung Mangkurat Tahun 2009. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Ekonomi, Universitas Lambung Mangkurat tahun 2012. Setelah menamatkan perkuliahan penulis bekerja di Lembaga Pengembangan Pendamping UMKM (LP2UMKM) Kalsel pada 2012-2014, kemudian Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar tetap di Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Selatan tahun 2015-2019 dan ASN di Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Palangka Raya tahun 2020-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional; aktif sebagai editor jurnal pada jurnal kampus; Mata Kuliah yang diampu diantaranya : Ekonomi Sumber daya Alam dan Lingkungan, Pengantar Ekonomi Mikro, Pengantar Ekonomi Makro, Ekonomi Regional dan Ekonomi Publik.



Dr. Ir. Ranno Marlany Rachman, ST., M.Kes

Lahir di Wua-Wua, Pada Tanggal 9 Desember 1980. Menyelesaikan S1 Jurusan Teknik Lingkungan Di Institut Teknologi Yogyakarta, Tahun 2003, S2 Jurusan Kesehatan Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang Tahun 2008 dan S3 Jurusan Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Tahun 2018. Aktivitas Saat ini adalah sebagai dosen tetap Program Studi Rekayasa Infrastruktur

Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo (UHO), Kendari Sulawesi Tenggara. Penulis telah menghasilkan 1 Buku Referensi dan 20 buku chapter antara lain yaitu Buku Remediasi Timbunan Tailing Berbasis Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi, Buku Ekotoksikologi (Pencemaran, Restorasi dan Masa Depan), Buku Pencemaran Air, Buku Mitigasi Bencana, Buku Polusi dan Lingkungan, Buku Merayakan kemerdekaan (Refleksi Dosen dalam Membangun Generasi Penerus Bangsa), Buku Pembangunan Infrastruktur Indonesia, Buku Revolusi Plastik dan Lingkungan, Buku Krisis Iklim Global Di Indonesia (Dampak dan Tantangan), Buku Beton Pracetak (Teknologi, Produksi dan Aplikasi), Buku Sosial Ekonomi Pertanian, Buku Kesuburan Tanah dan sebagainya.

DAYA DUKUNG LINGKUNGAN RUANG LAUT

Buku "Daya Dukung Lingkungan Ruang Laut" mengajak pembaca untuk memahami kompleksitas dan pentingnya lingkungan ruang laut. Dengan pendekatan holistik, buku ini menjelaskan dinamika oseanografi serta keanekaragaman biologi laut yang menjadi dasar dari ekosistem laut baik yang dangkal maupun dalam. Selain itu, pemanfaatan sumber daya hayati laut dan pengelolaannya juga dibahas secara mendalam. Perubahan iklim dan dampaknya terhadap lingkungan ruang laut menjadi sorotan utama, mengingat dampaknya yang semakin terasa. Buku ini juga memperkenalkan konsep pencemaran laut, dari sumbernya hingga dampaknya, serta strategi penanggulangannya. Tidak hanya itu, aspek konservasi dan pelestarian lingkungan ruang laut ditekankan sebagai upaya untuk mempertahankan keberlanjutan ekosistem laut. Peran komunitas lokal dalam pengelolaan lingkungan ruang laut turut dibahas, karena keterlibatan mereka sangat penting dalam menjaga kelestarian laut. Terakhir, buku ini memperkenalkan teknologi dan inovasi terkini yang dapat digunakan dalam pelestarian lingkungan ruang laut, menunjukkan bahwa solusi modern dapat menjadi bagian dari upaya konservasi yang efektif. Keseluruhan, buku ini menjadi panduan komprehensif bagi pembaca yang ingin memahami, menghargai, dan berkontribusi dalam menjaga keberlanjutan lingkungan ruang laut.



Penerbit KAMIYA JAYA AQUATIC
RT 008 RW 003 Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan,
Kota Ternate, Maluku Utara
Telp. : 0812-2279-3284
Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com
Website : <https://kjaquatic.com/>

